



**TUGAS AKHIR - TE141599**

**Optimasi Penempatan DG Menggunakan Metode PSO  
pada Jaringan Distribusi Mikrogrid untuk Meminimalisasi  
Rugi Daya**

Dwiky Alif Satria  
NRP 2212106003

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**FINAL PROJECT - TE141599**

**Optimum Distributed Generation Placement Using  
Particle Swarm Optimization Method of Microgrid  
Distribution Network for Losses Minimization**

Dwiky Alif Satria  
NRP 2212106003

Supervisors  
Prof. Ir. OntosenoPenangsang, M.Sc., Ph.D.  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty Of Industry Technology  
Sepuluh Nopember Institute Of Technology  
Surabaya 2015

**OPTIMASI PENEMPATAN DG MENGGUNAKAN  
METODE PSO PADA JARINGAN DISTRIBUSI  
MIKROGRID UNTUK MEMINIMALISASI RUGI DAYA**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dosen Pembimbing II,



**Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D**  
NIP. 1949 07151974121001

**Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D**  
NIP. 1980 06032006041003



## **Penempatan DG Menggunakan Metode PSO pada Jaringan Distribusi Mikrogrid untuk Meminimalisasi Rugi Daya**

Dwiky Alif Satria

NRP 2212106003

Dosen Pembimbing

Prof. Ontoseno Penangsang M.sc., Ph.D.

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

### **ABSTRAK**

Mikrogrid merupakan sumber tenaga listrik dengan energi yang terbarukan. Sistem tersebut menyalurkan daya dari berbagai sumber energi dan menjaga keseimbangan antara kebutuhan daya beban dengan daya pembangkitan. Sehingga diperlukan adanya suatu sistem pengaturan beban yang handal dan memadai. Sehingga dalam sistem mikrogrid ini diperlukan adanya pengamatan beberapa besaran, seperti profil tegangan bus, aliran daya nyata dan daya reaktif dalam saluran, pengaruh pengaturan kembali jaringan dan pemasangan peralatan-peralatan pengaturan untuk kondisi beban yang berbeda-beda guna memperoleh kondisi operasi sistem tenaga listrik yang optimal. Dalam sistem tenaga listrik, besaran-besaran tersebut dapat diketahui dengan cara melakukan analisis aliran beban (*load flow analysis*) untuk peletakan DG dan kemudian di optimasi dengan metode PSO sehingga dapat meminimalkan rugi daya pada jaringan distribusi mikrogrid *IEEE* 34 bus. Pada simulasi akhir didapatkan lokasi penempatan DG pada bus 26, 28, 8, dan 19. Setelah dilakukan optimasi maka didapatkan nilai rugi daya minimal sebesar 1115,08 W dimana sebelum dilakukan optimasi didapat nilai rugi daya sebesar 21756,10 W. Simulasi pada matlab juga divalidasi dengan Etap kemudian didapat perbedaan nilai sudut tegangan yang cukup signifikan ketika nilai Dg 4 (bus 19) dimasukkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **Optimum Distributed Generation Placement Using Particle Swarm Optimization Method of Microgrid Distribution Network for Losses Minimization**

Dwiky Alif Satria  
NRP 2212106003

## **Counsellor Lecturer**

Prof. Ontoseno Penangsang ,M.sc., Ph.d.  
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Microgrid is a source of electricity with renewable energy. Such systems distribute power from various energy sources and maintain a balance between the needs of power load power generation. So necessary to have a regulatory system that is reliable and adequate load. So in this microgrid system needed some amount of observations, such as bus voltage profile, the real power flow and reactive power in the channel, the effect of setting back the network and installation of equipment settings for different load conditions vary in order to obtain the operating conditions of electric power system optimal. In the electric power system, the quantities can be determined by the load flow analysis (load flow analysis) for laying DG and later in optimization with PSO method so as to minimize power losses in the distribution network mikrogid IEEE 34 bus. At the end of the simulation obtained DG placement locations on the bus 26,28,8, and 19. After the optimization, the obtained value of the minimum power loss of 1115,08 W where before the optimization of power loss values obtained by 21756.30 W. Simulation in matlab also validated with Etap then obtained voltage angle value difference is significant when the value of Dg 4 (bus 19) is inserted..

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Tidak lupa penyusun menyadari bahwa ini semua juga atas bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu dengan penuh rasa hormat dan rendah hati, penyusun mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kepada kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan kepercayaan, dukungan dan doa.
3. Kepada Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc.,Ph.D, Bapak Heri Suryatomo, ST., MT.,Ph.D., dan Bapak Suyanto, ST.,MT. atas bimbingan selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen penguji atas arahan dan kritikan yang telah diberikan demi kesempurnaan tugas akhir yang kami buat.
5. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
6. Seluruh Dosen dan Karyawan di jurusan Teknik Elektro ITS atas fasilitas dan waktu yang diberikan.
7. Teman-teman super seperjuangan LJ Sistem Tenaga angkatan 2013 semester genap yang telah berjuang bersama-sama untuk mendapatkan gelar Sarjana.
8. Laboratorium B103 Teknik Elektro ITS sebagai saksi bisu perjuangan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Semua teman-teman mahasiswa Lintas Jalur Teknik Elektro ITS angkatan 2013 semester genap.

Akhir kata, segala kritik dan saran sangat saya harapkan untuk pengembangan selanjutnya.

Surabaya, 26 Januari 2015

Penyusun



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB 1      PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan.....	1
1.3 Tujuan.....	1
1.4 Metodologi.....	2
1.5 Sistematika.....	3
1.6 Relevansi.....	4
<b>BAB 2      DASAR SISTEM TENAGA LISTRIK</b>	
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1 Besaran Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.1.1.1 Tegangan.....	5
2.1.1.2 Arus Listrik.....	5
2.1.1.3 Daya Listrik.....	6
2.2 Daya Listrik Sistem Satu Fasa.....	7
2.3 Sistem Penyaluran Daya Listrik.....	11
2.3.1 Pembangkitan.....	12
2.3.2 Saluran Transmisi.....	13
2.3.3 Saluran Distribusi.....	15
2.4 Distributed Generation.....	19
2.4.1 Sejarah Perkembangan DG.....	19
2.4.2 Definisi Distributed Generation.....	20
2.4.3 Teknologi DG di Indonesia.....	20
2.4.4 Keuntungan Distributed Generation.....	23
2.5 Sistem Kelistrikan <i>Microgrid</i> .....	24
2.5.1 Pembangkitan <i>Microgrid</i> .....	24

	2.5.1.1 Photovoltaic.....	25
	2.5.1.2 Turbin Angin.....	26
	2.5.1.3 Diesel Generator.....	
	2.5.1.4 Baterai.....	
	2.5.2 Mode Operasi Microgrid.....	
	2.5.2.1 Stand Alone (off grid) .....	
	2.5.2.2 Grid Connected (on grid).....	
<b>BAB 3</b>	<b>Particle Swarm Optimization,ZBR/K-matriks, dan Konfigurasi IEEE 34 Bus Radial</b>	
	3.1 Teori Particle Swarm optimization.....	31
	3.1.1 Global Best PSO.....	31
	3.2 Metode K-Matrik dan $Z_{BR}$ .....	36
	3.2.1 Metode $Z_{BR}$ .....	36
	3.2.2 Metode K-Matrik.....	40
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULASI DAN ANALISIS</b>	
	4.1 Flowchart Simulasi.....	47
	4.2 Hasil Simulasi load flow.....	49
	4.2.1 Data load flow dan Grafik validasi sudut tegangan.....	49
	4.3 Hasil penempatan optimum DG.....	56
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
	5.1 Kesimpulan.....	59
	5.2. Saran.....	59



## DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1 Penggolongan Tegangan .....	5
Tabel 2.2 Jenis-jenis Saluran Transmisi .....	14
Tabel 2.3 Klasifikasi DG berdasarkan kapasitas pembangkitan .....	22
Tabel 2.4 Klasifikasi DG berdasarkan teknologi pembangkitan .....	23
Tabel 3.1 <i>Overhead Line Configuration</i> .....	43
Tabel 3.2 <i>Line Segment Data</i> .....	44
Tabel 3.3 <i>Spot Load Data</i> .....	45
Tabel 4.1 Data Load flow tanpa DG .....	49
Tabel 4.2 Data Load flow ditambahkan nilai 1 DG .....	50
Tabel 4.3 Data Load flow ditambahkan nilai 2 DG .....	50
Tabel 4.4 Data Load flow ditambahkan nilai 3 DG .....	51
Tabel 4.5 Data Load flow ditambahkan nilai 4 DG .....	52
Tabel 4.6 Data Hasil Optimasi Penempatan DG .....	56

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Segitiga daya .....6
Gambar 2.2	Diagram fasor segitiga daya .....9
Gambar 2.3	Rangkaian Seri.....10
Gambar 2.4	Diagram daya kompleks.....11
Gambar 2.5	Penyaluran daya listrik.....12
Gambar 2.6	Lokasi distribusi primer dan distribusi sekunder .....15
Gambar 2.7	Sistem distribusi radial.....16
Gambar 2.8	Sistem distribusi loop.....17
Gambar 2.9	Sistem distribusi spindel.....18
Gambar 2.10	Interkoneksi DG .....21
Gambar 2.11	Kurva daya AIR403 .....26
Gambar 2.12	Tipe <i>microgrid stand-alone</i> .....30
Gambar 2.13	Tipe <i>grid-connected pada microgrid</i> .....30
Gambar 3.1	Diagram alir PSO.....32
Gambar 3.3	Single line diagram analisis menggunakan metode <i>network topology</i> .....37
Gambar 3.4	Contoh rangkaian 3 fasa untuk membentuk matrik $Z_{BR}$ ..... 39
Gambar 3.5	Single line diagram contoh analisis menggunakan metode K-matrik.....41
Gambar 3.6	Konfigurasi <i>IEEE 34 Bus Radial Distribution</i> <i>Feeder</i> .....43
Gambar 4.1	Prosedur Simulasi Penempatan DG .....47
Gambar 4.2	Grafik sudut tegangan tanpa input DG.....53
Gambar 4.3	Grafik sudut tegangan dengan input 1 DG.....54
Gambar 4.4	Grafik sudut tegangan dengan input 2 DG.....54
Gambar 4.5	Grafik sudut tegangan dengan input 3 DG.....55
Gambar 4.6	Grafik sudut tegangan dengan input 4 DG.....55
Gambar 4.7	Grafik perbandingan rugi daya .....57

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan pasokan daya listrik memacu perkembangan berbagai macam energi terbarukan. *Microgrid* merupakan sistem energi listrik yang menggunakan berbagai energi terbarukan sebagai sumbernya. Sistem tersebut dapat menyalurkan daya dari berbagai sumber energi dan menjaga keseimbangan antara kebutuhan daya beban dan daya yang dibangkitkan. *Microgrid* dapat diaplikasikan disuatu wilayah tertentu dengan beberapa konsumen yang terisolasi. Sistem ini mengandung komponen penyimpan energi sehingga dapat mengatasi fluktuasi kebutuhan daya beban dan kelebihan daya dari energi terbarukan dalam wilayah tersebut. Di dalam sistem ini juga menggunakan teknologi informasi dan komunikasi untuk mengontrol pengintegrasian dari berbagai distribusi sumber energi dan beban. Perkembangan *microgrid* menimbulkan pemikiran tentang efisiensi energi dan penyimpanan energi. Salah satu hal yang dipertimbangkan dalam *microgrid* adalah efisiensi dalam penyimpanan energi listrik. Peningkatan kebutuhan konsumen dan peningkatan rugi-rugi di jaringan menyebabkan peningkatan konsumsi energi. Oleh karena itu, pengaturan untuk meminimalkan rugi-rugi daya dibutuhkan dalam mengatasi kebutuhan puncak dan menurunkan konsumsi energi.

Pada tugas akhir ini dibuat metode optimalisasi penempatan *distributed generation* (DG) untuk menentukan lokasi penempatannya agar didapatkan nilai rugi-rugi daya yang paling minimal. Metode optimalisasi penempatan *distributed generation* (DG) yang digunakan adalah *particle swarm optimization* (PSO). Kelebihan utama algoritma PSO adalah mempunyai konsep sederhana, mudah diimplementasikan, dan efisien dalam perhitungan jika dibandingkan dengan algoritma matematika dan teknik optimisasi heuristik lainnya.[2]. Sehingga judul tugas akhir yang saya ambil berjudul “Optimasi Penempatan DG Menggunakan Metode PSO pada Jaringan Distribusi Mikrogrid untuk Meminimalisasi Rugi Daya”

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tugas akhir ini bertujuan untuk penempatan optimal *distributed generation* (dg) untuk meminimalkan rugi daya menggunakan metode particle swarm optimization (PSO) sehingga didapatkan lokasi dg dan nilai rugi daya yang paling minimal.

## 1.3 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Penempatan optimal lokasi dg untuk meminimalkan rugi daya menggunakan metode PSO.
2. Membandingkan nilai rugi daya pada saat melakukan penempatan dg tanpa menggunakan metode dan setelah melakukan optimasi penempatan dengan menggunakan metode PSO

## 1.4 Batasan Masalah

Untuk menyelesaikan masalah dalam tugas akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut :

1. Fungsi obyektif dari optimisasi yang dilakukan adalah meminimumkan total rugi-rugi daya nyata
2. Penempatan optimal dg menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO).
3. Pengerjaan program menggunakan matlab.
4. Menggunakan sistim distribusi IEEE 34 bus.

## 1.5 Metode Penelitian

Pada tugas akhir ini dibuat program untuk mendapatkan posisi sensor pengukuran untuk state estimation menggunakan metode Particle Swarm Optimization (PSO). Program dibuat dengan menggunakan software Matlab. Tahapan untuk menyelesaikan tugas akhir ini adalah

1. Studi literature  
Literature yang digunakan berasal dari *paper*, jurnal dan *text book*. Dalam studi literature dipelajari teori – teori pendukung seperti Particle Swarm Optimization (PSO) dan State Estimation serta perancangan perangkat lunak menggunakan Matlab.

2. Pengumpulan data  
Data yang digunakan meliputi data bus dan data kabel. Data bus terdiri atas data beban yang digunakan untuk mendapatkan nilai daya aktif dan daya reaktif pada setiap cabang. Data saluran terdiri atas resistansi dan reaktansi tiap kabel. Semua data tersebut digunakan untuk memperoleh data pengukuran sebenarnya menggunakan software matlab.
3. Pemodelan program  
Pemodelan program dilakukan untuk mendapatkan model program dari optimalisasi penempatan *distributed generation* (dg). Pemodelan dimaksudkan untuk mengetahui lokasi penempatan dg paling optimal. Input berupa data power flow, power injection, dan data saluran. Output berupa posisi terbaik penempatan dg, hasil rugi-rugi daya aktif yang paling minimal.
4. Perancangan perangkat lunak  
Perancangan perangkat lunak untuk memperoleh penempatan optimal *distributed generation* (dg).. Perancangan perangkat lunak menggunakan Matlab.
5. Simulasi dan analisis  
Simulasi dilakukan dengan menggunakan sistem distribusi IEEE 34 bus. Simulasi terdiri atas 2 program utama yaitu load flow aktif dan optimalisasi menggunakan particle swarm optimization (PSO). Optimalisasi digunakan untuk mengetahui penempatan optimal *distributed generation* (dg). dan digunakan untuk mendapatkan nilai rugi daya paling minimal pada jaringan tersebut.
6. Penulisan buku  
Hasil penelitian yang telah dilakukan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir dan paper. Laporan berisi metode dan kesimpulan dari penelitian.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam suatu sistematika sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, tujuan penelitian, permasalahan, batas

masalah, metode penelitian, sistematika penulisan dan relevansi dari Tugas Akhir.

- Bab 2 : Dasar teori yang menjelaskan teori mengenai dasar sistem tenaga listrik dan analisa aliran daya .
- Bab 3 : Pembahasan teori metode *Backward-Forward* yang digunakan pada proses aliran daya dan teori optimalisasi *particle swarm optimization*.
- Bab 4 : Hasil simulasi penempatan optimal *distributed generation* (dg). Untuk meminimalkan rugi daya aktif pada sistem distribusi IEEE 34 bus.
- Bab 5 : Kesimpulan Tugas Akhir yang mengemukakan hasil pembahasan dan saran-saran sehubungan dengan pokok-pokok pembahasan.

### **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan sistem kelistrikan, khususnya pada permasalahan yang terkait dalam kurangnya alat pengukuran dan penempatan sensor secara optimal pada sistem tenaga listrik.
2. Dapat meningkatkan penguasaan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) di bidang Sistem Tenaga listrik bagi pengusul Tugas Akhir.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang akan mengambil Tugas Akhir yang mengambil masalah yang serupa.

## **BAB 2**

### **DASAR SISTEM TENAGA LISTRIK**

#### **2.1 Sistem Tenaga Listrik**

Energi listrik merupakan jenis energi yang paling efisien dan efektif untuk dibangkitkan dan didistribusikan untuk keperluan masyarakat. Energi listrik diperoleh dari hasil konversi energi primer seperti energi panas, energi potensial, energi mekanik dan lain-lain. Sehingga dalam proses pembangkitan maupun rekayasanya, banyak parameter maupun besaran yang harus diperhatikan.

##### **2.1.1 Besaran Sistem Tenaga Listrik**

Untuk mempelajari dan menganalisis suatu sistem tenaga listrik wajib diketahui beberapa parameter maupun besaran yang ada untuk mengetahui gejala-gejala listrik yang ada.

###### **2.1.1.1 Tegangan**

Tegangan adalah perbedaan potensial antara dua titik dalam suatu rangkaian listrik dan dinyatakan dalam satuan volt. Tegangan dapat menunjukkan besar energi potensial listrik yang menimbulkan adanya aliran listrik pada suatu konduktor. Secara umum dalam sistem tenaga listrik, besar tegangan dibagi menjadi beberapa golongan yaitu:

**Tabel 2.1** Penggolongan tegangan

Golongan Tegangan	Rentang Nilai Tegangan
Tegangan Ekstra Rendah	< 50 volt
Tegangan Rendah	50 volt – 1000 volt
Tegangan Menengah	1000 volt – 35000 volt
Tegangan Tinggi	> 35000 volt

###### **2.1.1.2 Arus Listrik**

Arus listrik adalah jumlah muatan listrik yang mengalir pada konduktor sirkuit listrik per detik. Arus listrik terjadi akibat adanya pergerakan elektron-elektron dalam konduktor yang bertegangan. Arus listrik dinyatakan dalam satuan Coulomb/detik tau lebih umum disebut dengan Ampere.

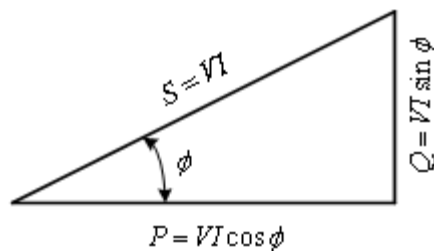
### 2.1.1.3 Daya Listrik

Daya listrik adalah laju hantaran energi listrik dalam suatu sirkuit listrik. Dalam sistem tenaga listrik, daya listrik dibagi menjadi 3 jenis daya sesuai dengan bagaimana proses pembangkitannya, yaitu daya aktif, daya reaktif, dan daya total.

Daya aktif adalah daya yang dihasilkan dari energi yang nyata dan digunakan untuk melakukan energi yang nyata pula. Pada prinsipnya daya aktif dibangkitkan dari proses konversi energi primer seperti energi panas, energi mekanik, ataupun energi potensial. Daya aktif disimbolkan dengan “P” dan dinyatakan dalam satuan Watt.

Daya reaktif adalah daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet. Pada prinsipnya daya reaktif dihasilkan dari pembangkitan medan listrik pada generator sinkron melalui sistem eksitasinya. Daya reaktif disimbolkan dengan “Q” dan dinyatakan dalam satuan VAR. Daya total adalah daya yang dihasilkan dari perkalian antara arus dan tegangan, disimbolkan dengan “S” dan dinyatakan dalam satuan VA [1].

Dalam mendefinisikan hubungan antara tiga daya tersebut, digunakan teori segitiga daya.



**Gambar 2.1** Segitiga daya

Dari gambar segitiga daya di atas dapat disimpulkan hubungan antara ketiganya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} S &= V \times I \\ P &= V \times I \times \cos \phi \\ Q &= V \times I \times \sin \phi \end{aligned}$$

$\cos \phi$  merupakan sudut yang merepresentasikan hubungan antara ketiga daya tersebut. Dalam sistem tenaga listrik,  $\cos \phi$  merupakan parameter penting yang biasa disebut dengan faktor daya.  $\cos \phi$  juga menunjukkan adanya perbedaan sudut antara gelombang tegangan dan gelombang arus dalam fungsi waktu. Apabila suatu beban memiliki karakteristik gelombang arus yang tertinggal maka beban tersebut memiliki nilai  $\cos \phi$  negatif atau disebut dengan *lagging*. Namun, apabila suatu beban memiliki karakteristik gelombang arus yang mendahului gelombang tegangan maka beban tersebut memiliki nilai  $\cos \phi$  positif atau disebut dengan *leading*.

## 2.2 Daya Listrik Sistem Satu Fasa

Bentuk gelombang tegangan pada bus-bus dari sistem tenaga dapat diasumsikan sebagai sinyal sinusoidal murni pada frekuensi yang tetap. Tegangan dilambangkan dengan huruf  $V$  besar dan arus dilambangkan dengan huruf  $I$  besar, lambang tersebut digunakan untuk menentukan fasor tegangan dan arus.  $|V|$  dan  $|I|$  melambangkan *magnitude* fasor. Huruf  $v$  dan  $i$  melambangkan nilai sesaat. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator dilambangkan dengan huruf  $E$ . Tegangan antara dua titik dilambangkan dengan huruf  $V$ .

Sebagai contoh tegangan dan arus dalam fungsi waktu dapat dilihat sebagai berikut :

$$v = 141.4 \cos(\omega t + 30^\circ)$$

$$i = 7.07 \cos \omega t$$

Nilai maksimum tegangan adalah  $V_{\max} = 150$  dan  $I_{\max} = 10$

A. Tanda mutlak adalah nilai rms (*root mean square*) melambangkan nilai *magnitude*, yang sama dengan nilai maksimum dibagi  $\sqrt{2}$ .

$$|V| = 100 \text{ V dan } |I| = 5 \text{ A}$$

Nilai *magnitude* adalah nilai yang dibaca oleh voltmeter dan amperemeter. Nama lain dari rms adalah nilai efektif. Daya rata-rata pada sebuah resistor adalah  $|I|^2 R$ .

Hubungan antara  $V$ ,  $I$  dan  $Z$  (impedansi) dalam suatu rangkaian dituliskan sebagai berikut :

$$V = I \times Z \quad (2.1)$$

Rumus daya sesaat dalam fungsi waktu dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$P(t) = v(t)i(t) = V_m I_m [\cos(\omega t) \cos(\omega t - \theta)] \quad (2.2)$$

Dengan menggunakan identitas trigonometri diperoleh :

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.3)$$

Sehingga rumus daya sesaat dalam fungsi waktu dapat dituliskan sebagai berikut :

$$P(t) = V_m I_m [\cos \theta + \cos(2\omega t - \theta)]/2 \quad (2.4)$$

Daya rata-rata  $P_{av}$  adalah :

$$P_{av} = V_m I_m \cos \theta / 2 \quad (2.5)$$

Penggunaan nilai efektif (rms) lebih sering dan lebih mudah digunakan daripada nilai maksimum. Dengan mensubstitusikan

$$V_m = \sqrt{2}(V_{rms}),$$

Dan  $I_m = \sqrt{2}(I_{rms})$  diperoleh :

$$P_{av} = V_{rms} I_{rms} \cos \theta \quad (2.6)$$

$\theta$  bernilai positif untuk arus lagging, sedangkan  $\theta$  bernilai negatif untuk arus leading.

Daya yang masuk pada jarring listrik adalah hasil dari nilai efektif tegangan terminal, arus dan cosinus dari sudut fasa  $\theta$  yang disebut juga faktor daya (*Power Factor = PF*). Hal ini diterapkan pada tegangan dan arus sinusoidal. Untuk beban resistif murni,  $\cos \theta = 1$ , dan semua arus digunakan untuk menyalurkan daya dari sumber ke beban. Jika ada reaktansi, komponen arus dalam rangkaian diikat untuk menyalurkan energi yang secara periodik disimpan dan dilepas dari reaktansi. Energi yang tersimpan, akan disalurkan menuju dan dari medan magnet dari induktansi atau medan listrik dari kapasitansi, yang ditambahkan pada arus dalam rangkaian, tetapi tidak ditambahkan pada daya rata-rata.

Daya rata-rata dalam rangkaian disebut sebagai daya aktif, dan daya yang mensuplai energi yang tersimpan pada elemen reaktif disebut daya reaktif. Daya aktif dilambangkan dengan  $P$ , daya reaktif dilambangkan dengan  $Q$ , sehingga :

$$P = VI \cos \theta \quad (2.7)$$

$$Q = VI \sin \theta \quad (2.8)$$

$\cos \theta$  lagging untuk rangkaian induktif, sedangkan  $\cos \theta$  leading untuk rangkaian kapasitif. Pada kedua persamaan,  $V$  dan  $I$  adalah nilai rms dari tegangan terminal dan arus, dan  $\theta$  adalah sudut fasa antara arus yang tertinggal terhadap tegangan.

$P$  dan  $Q$  berada pada dimensi yang sama, yaitu *watt*. Untuk menekan bahwa  $Q$  adalah daya reaktif, maka  $Q$  dinyatakan dalam unit *Volt-Ampere Reaktif (VAR)*.



Dengan mengasumsikan  $V$ ,  $V\cos\theta$ , dan  $V\sin\theta$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11, masing-masing dikalikan dengan  $I$ , nilai arus rms. Ketika komponen tegangan tegangan  $V\cos\theta$  dan  $V\sin\theta$  dikalikan arus akan berubah jadi  $P$  dan  $Q$ . Begitu juga  $I\cos\theta$  dan  $I\sin\theta$  dikalikan dengan  $V$ , akan berubah jadi  $VI$ ,  $P$  dan  $Q$ .

Daya yang dinyatakan dalam bentuk bilangan kompleks dilambangkan dengan  $S$ , terdiri dari komponen  $P$  dan  $Q$  yaitu :

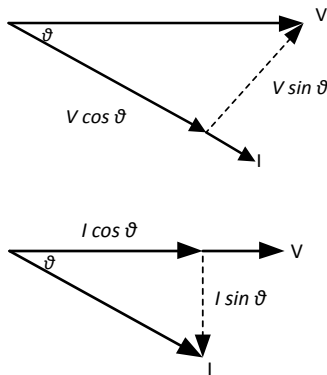
$$\begin{aligned} S &= P + jQ \\ &= VI \cos \theta + jVI \sin \theta \\ &= VI (\cos \theta + j \sin \theta) \end{aligned}$$

(2.9)

Dengan menggunakan identitas Euler diperoleh :

$$S = VI \angle \theta$$

(2.10)



**Gambar 2.2** Diagram fasor segitiga daya

Arus conjugate didefinisikan dengan menambahkan tanda bintang

(\*)

$$I^* = |I| \angle -\theta \quad (2.11)$$

$$S = VI^* \quad (2.12)$$

Untuk menulis daya kompleks dapat dilakukan dalam dua bentuk alternatif dengan menggunakan hubungan :

$$V = ZI \text{ dan } I = YV \quad (2.13)$$

sehingga

$$S = ZII^* = Z|I|^2 \quad (2.14)$$

Atau

$$S = VI^*V^* = Y^*|V|^2 \quad (2.15)$$

Dengan menerapkan rumus di atas pada gambar 2.8, diperoleh bahwa tegangan yang diterapkan sama dengan jumlah drop tegangan :

$$V = I(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n) \quad (2.16)$$

Dengan mengalikan kedua sisi persamaan di atas dengan  $I^*$  akan menghasilkan :

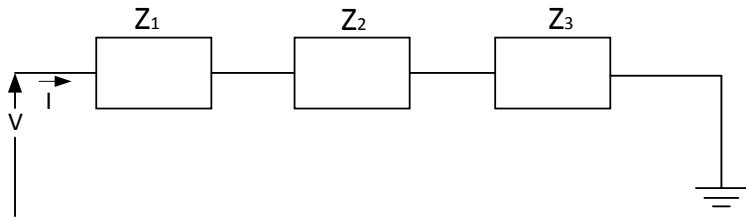
$$S = VI^* = I^*(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n) \quad (2.17)$$

atau

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2.18)$$

Dengan

$$S_i = |I|^2 Z_i \quad (2.19)$$



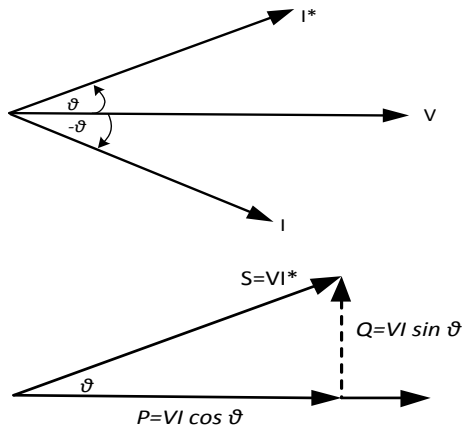
**Gambar 2.3** Rangkaian Seri

menjadi elemen tunggal daya kompleks. Persamaan (2.18) diketahui sebagai aturan penjumlahan untuk daya kompleks. Aturan penjumlahan juga diterapkan pada rangkaian paralel. Penggunaan aturan penjumlahan dan konsep daya kompleks memberikan keuntungan dalam menyelesaikan masalah dari analisis sistem tenaga.

Diagram fasor yang ditunjukkan pada gambar 2.11 dapat dikonversikan ke dalam diagram daya kompleks dengan tegangan dan arus. Kondisi rangkaian induktif dengan arus lagging terhadap tegangan dengan sudut  $\theta$ . Arus conjugate akan berada pada kuadran pertama pada bilangan kompleks seperti yang ditunjukkan pada

gambar 2.13(a). Dengan mengalikan fasor dengan  $V$ , dapat diperoleh diagram daya kompleks seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13(b). Pada diagram dapat diketahui hubungan faktor daya pada rangkaian :

$$\cos \theta = \frac{P}{|S|} \quad (2.20)$$

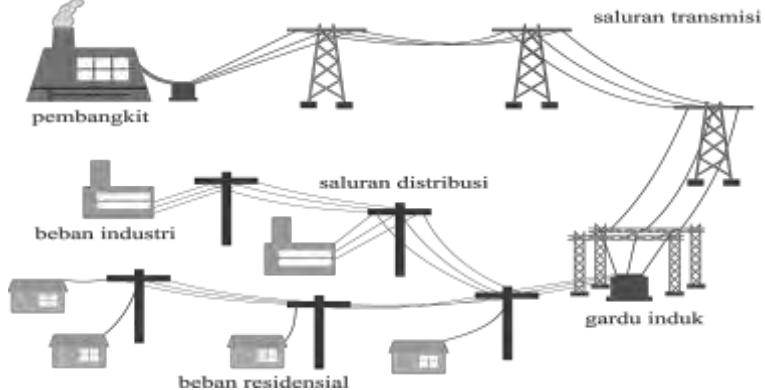


**Gambar 2.4** Diagram daya kompleks

### 2.3 Sistem Penyaluran Daya Listrik

Energi listrik merupakan energi yang mudah untuk didistribusikan dan direkayasa untuk kebutuhan masyarakat[2]. Karena besarnya kebutuhan masyarakat akan energi maka dibangunlah pusat-pusat pembangkitan energi listrik dalam skala besar. Tentunya pembangkitan energi listrik dalam skala besar tersebut harus didistribusikan secara seimbang ke masyarakat atau pelanggan. Umumnya pusat-pusat pembangkit tenaga listrik berlokasi jauh dengan pusat konsentrasi beban, seperti di pingir laut,

di pegunungan dan tempat-tempat lain dimana sumber-sumber energi primer didapatkan atau mudah dalam pengiriman.



**Gambar 2.5** Penyaluran daya listrik

Energi listrik yang dibangkitkan oleh pembangkit kemudian disalurkan melalui saluran transmisi untuk menyalurkan daya listrik menuju beban yang umumnya berpusat di perkotaan. Sehingga daya listrik harus disalurkan melewati saluran konduktor yang sangat panjang. Kemudian daya dikirimkan hingga sampai ke pelanggan melalui saluran distribusi. Pada saluran distribusi ini, beban didistribusikan secara merata dan sesuai dengan kebutuhan pelanggan.

### 2.3.1 Pembangkitan

Energi listrik merupakan energi yang didapatkan dari proses konversi dari bentuk energi yang lain. Untuk sistem pembangkitan skala besar yang umum diterapkan pada sistem tenaga listrik, daya listrik dibangkitkan menggunakan generator sinkron. Generator sinkron merupakan mesin listrik berputar yang komponen utamanya terdiri dari stator dan rotor. Rotor merupakan bagian dari generator sinkron yang berputar akibat dikopel dengan penggerak mula. Penggerak mula pada generator sinkron adalah turbin yang jenisnya bermacam-macam tergantung dari jenis pembangkit atau energi primernya.

Rotor pada generator sinkron merupakan belitan berputar yang diinjeksikan arus listrik DC, sehingga menjadi sebuah magnet. Selain itu terdapat juga stator yang berupa belitan pula mengelilingi rotor dengan dibatasi oleh *air gap*. Berdasarkan prinsip elektromagnetik, timbul medan listrik di antara rotor dan stator sehingga pada belitan stator timbul tegangan GGL yang akhirnya menghasilkan daya listrik.

Dalam sistem tenaga listrik interkoneksi, pembangkit-pembangkit listrik terletak menyebar di setiap daerah tertentu. Setiap pusat pembangkit memiliki kapasitas yang berbeda dan beroperasi pada mode yang berbeda. Terdapat pembangkit yang beroperasi untuk menanggung beban dasar (*base load*) dan ada pula yang beroperasi untuk menanggung beban puncak (*peak load*). Pembangkit untuk beban dasar merupakan pembangkit yang memiliki biaya pembangkitan yang murah serta memiliki kapasitas pembangkitan yang besar. Di Indonesia khususnya di sistem Jawa-Bali, beban dasar ditanggung oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan bahan bakar batu bara, serta Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Sedangkan untuk beban puncak ditanggung oleh pembangkit yang biaya pembangkitannya relatif lebih mahal tetapi memiliki respon terhadap perubahan pembangkitan yang cepat sehingga dapat menyesuaikan sistem terhadap perubahan beban yang sangat dinamis.

Dalam melakukan operasi pembangkitan daya listrik, semua pusat-pusat pembangkit tenaga listrik dikoordinasi dan diatur pembangkitannya oleh pusat pengatur beban. Pusat pengatur beban bertugas untuk melakukan pertimbangan pembangkitan, penyesuaian beban, serta melakukan mekanisme *dispatching* untuk menentukan mana unit pembangkit yang dapat menyuplai beban dilihat dari sisi ekonomis di setiap waktu tertentu. Hal ini dilakukan untuk menjaga kontinuitas pelayanan, stabilitas sistem, serta untuk melakukan proses pengamanan sistem tenaga listrik.

### **2.3.2 Saluran Transmisi**

Daya listrik yang telah dibangkitkan oleh generator disalurkan menuju beban melalui saluran transmisi. Saluran transmisi merupakan saluran konduktor yang terbentang panjang dan bertegangan tinggi. Saluran transmisi digunakan untuk menyalurkan daya listrik dari pembangkit yang letaknya sangat jauh

dari pusat-pusat beban. Karena saluran transmisi terbentang sangat panjang maka kemungkinan rugi-rugi tegangan dan daya akibat arus yang tinggi cukup besar, sehingga nominal tegangan yang digunakan pada saluran transmisi adalah tegangan tinggi. Berdasarkan sistem transmisi dan kapasitas tegangan yang disalurkan, saluran transmisi dapat dibagi menjadi :

**Tabel 2.2** Jenis-jenis saluran transmisi

Jenis Saluran	Nominal Tegangan (kV)
Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)	200 – 500
Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT)	30 – 150
Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT)	30 – 150

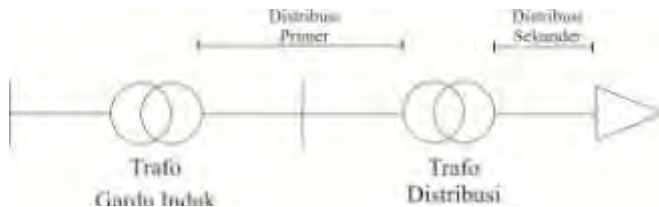
Transmisi sistem tenaga listrik harus didesain sedemikian rupa sehingga dapat mentransmisikan daya listrik dengan rugi-rugi yang kecil. Untuk transmisi daya yang besar digunakan level tegangan yang lebih tinggi, sehingga besar arus yang mengalir dalam saluran akan lebih kecil. Saluran transmisi memiliki peranan yang penting dalam menjaga tersalurnya daya dari pembangkit ke beban. Dari saluran inilah dapat dipantau beberapa parameter penyaluran daya sehingga dapat mengetahui kondisi perubahan beban setiap waktu dan untuk melakukan mekanisme pengaturan kondisi pembangkitan.

Dalam penyaluran daya listrik, saluran transmisi dikelola oleh sebuah badan yang bertugas untuk mengawasi kondisi aliran daya, kestabilan sistem serta pemenuhan kebutuhan daya beban. Semua unit pembangkit harus beroperasi sesuai dengan perintah dari badan pengelola transmisi. Sehingga badan inilah yang melakukan pembagian pembebanan setiap unit pembangkit atau yang umum disebut dengan *economic dispatch*.

### 2.3.3 Sistem Distribusi

Sistem ini berfungsi untuk menyalurkan dan mendistribusikan tenaga listrik dari Gardu induk menuju kelompok beban. Jaringan distribusi dapat dibedakan menjadi 2 menurut posisi yang ditunjukkan pada gambar 2.2 :

1. Jaringan distribusi primer ( jaringan distribusi tegangan menengah )
2. Jaringan distribusi sekunder ( jaringan distribusi tegangan menengah )



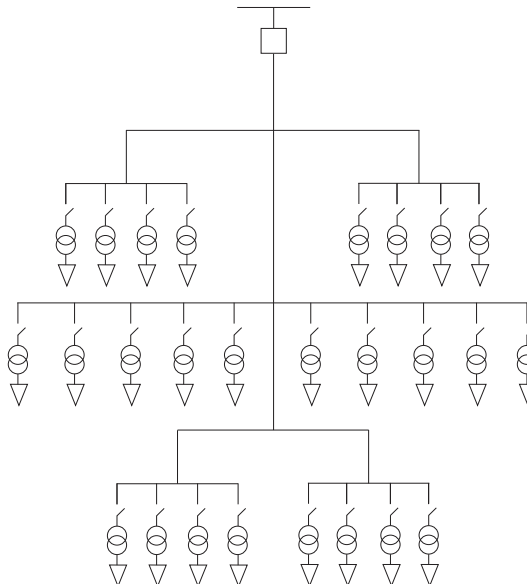
**Gambar 2.6** Lokasi distribusi primer dan distribusi sekunder

Jaringan distribusi primer menyalurkan tenaga listrik pada tegangan menengah. Lokasi jaringan tersebut terletak sebelum trafo distribusi. Jaringan tersebut menghubungkan antara sisi sekunder trafo gardu induk dengan sisi primer trafo distribusi. Pada Jaringan distribusi sekunder menyalurkan tenaga listrik pada tegangan rendah 220V/380V. Lokasi jaringan terletak setelah trafo ditribusi. Jaringan distribusi sekunder menghubungkan sisi sekunder pada trafo distribusi dengan sisi konsumen.

Jaringan distribusi juga bisa dibagi berdasarkan konfigurasi jaringan, maka sistem jaringan distribusi dibagi menjadi 3 konfigurasi :

a. Sistem Distribusi Distribusi Radial

Pada bentuk jaringan ini merupakan bentuk yang paling sederhana dan banyak digunakan. Hal ini disebabkan biaya untuk membentuk jaringan ini cukup murah. Jaringan ini dinamakan jaringan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik sumber dan dicabang – cabangkan ke titik beban. Hal ini dapat diperlihatkan pada gambar 2.3



**Gambar 2.7** Sistem distribusi radial

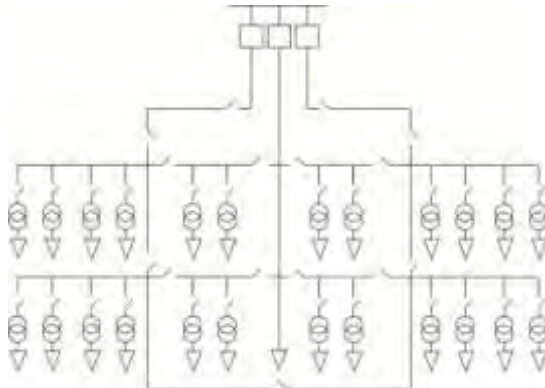
Sumber yang berasal dari satu titik dan terdapat percabangan-percabangan penyebab perbedaan arus beban yang mengalir pada setiap saluran. Hal ini menyebabkan perbedaan luas penampang konduktor. Sehingga saluran yang lokasinya paling dekat dengan gardu induk maka memiliki luas penampang yang lebih besar dan saluran cabang-cabangnya semakin mendekati ujung maka luas penampang semakin kecil.

Pada konfigurasi ini memiliki kekurangan dalam hal kualitas pelayanan daya dan kontinuitas pelayanan kurang baik. Kualitas daya kurang baik disebabkan oleh rugi tegangan dan rugi daya yang relatif besar. hal yang mempengaruhi semakin buruknya kualitas daya adalah besar nilai impedansi dan nilai arus yang melewati saluran. konfigurasi ini memiliki kontinuitas yang kurang baik disebabkan hanya memiliki satu alternatif saluran. sehingga saat saluran terjadi gangguan maka saluran sesudah gangguan akan mengalami pemadaman total selama permasalahan belum teratasi .



b. Sistem Jaringan Distribusi Loop

Pada konfigurasi ini membentuk jaringan tertutup sehingga memiliki nama lain yaitu jaringan ring. Konfigurasi jaringan memungkinkan beban dilayani oleh dua arah saluran sehingga kontinuitas pelayanan lebih baik. Kontinuitas daya lebih baik karena saat terjadi gangguan pada salah satu saluran maka saluran setelah gangguan mampu di suplai oleh sumber lain. Dapat terlihat pada gambar 2.4



**Gambar 2.8** Sistem distribusi loop

Konfigurasi diatas membuat keandalan sistem jaringan ini lebih baik dari jaringan radial. Bentuk sistem jaringan distribusi loop ada dua macam, yaitu :

1. Open Loop

Salah satu bagian diantara gardu distribusi dilengkapi normally open switch sehingga saat keadaan normal rangkaian tersebut akan selalu terbuka.

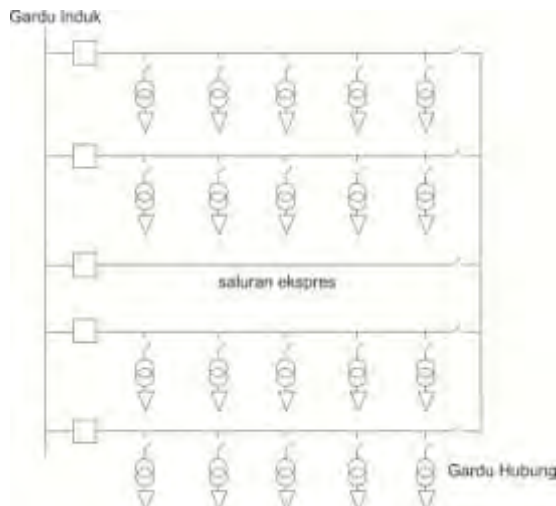
2. Close Loop

Salah satu bagian diantara gardu distribusi dilengkapi normally close switch sehingga saat keadaan normal rangkaian tersebut akan selalu tertutup.. Pada sistem ini memiliki

kekurangan dalam hal investasi yang lebih mahal. Sistem ini digunakan pada daerah padat dan memerlukan keandalan tinggi.

c. Sistem Jaringan Distribusi Spindel

Saluran konfigurasi spindel yang menggunakan kabel tanah tegangan menengah yang digunakan untuk kota-kota besar. Sistem jaringan spindle menggunakan saluran ekspres tidak dibebani dan dihubungkan dengan gardu hubung. Saluran ini digunakan untuk pemasok energi listrik cadangan untuk gardu hubung seperti pada gambar 2.5.



**Gambar 2.9** Sistem distribusi spindel

Saat saluran mengalami gangguan, maka saklar pada bagian yang terganggu akan dibuka. Kemudian saluran lain yang terhubung oleh gardu hubung mendapat suplai dari saluran ekspres sehingga bagian yang tidak terganggu akan tetap tersuplai energi.

## 2..4 Distributed Generation (DG)

*Distributed Generation* seringkali disebut juga dengan *on-site generation*, *dispersed generation*, *embedded generation*, *decentralized generation*, atau *distributed eneryi*. Secara mendasar, DG menghasilkan energi listrik dari beberapa sumber energi yang berkapasitas kecil dan dihubungkan langsung pada jaringan distribusi.

### 2.4.1 Sejarah Perkembangan DG

Beberapa publikasi yang ada sekarang tentang *Distributed Generation* menunjukkan bahwa DG merupakan suatu fenomena baru dan berkembang secara signifikan hampir di seluruh dunia. Namun, analisis dari Lembaga Energy Information Administration di Amerika Serikat menunjukkan bahwa implementasi DG telah berkembang secara drastis pada akhir tahun 1980-an dan pertengahan tahun 1990-an.

Sebenarnya, perkembangan DG dalam tahap awal telah dimulai ketika DG digunakan sebagai *co-generator*. Penggunaan *co-generator* dimulai pada masa tahun 1960-an dan banyak dikembangkan pada lokasi-lokasi industri dengan memanfaatkan panas dari gas buang kondensor (output thermal dari alat pemanas berdaya besar).

Pasar untuk DG terus berkembang. Unit- uni DG terus diuji pada konsumen-konsumen perumahan, industri dan sebagainya sebagai salah satu sumber energi listrik yang mereka butuhkan. Di sisi lain, keuntungan dari DG menunjukkan potensi yang besar. Dengan perubahan struktur energi listrik yang terus berkembang, saat ini DG telah dimanfaatkan sebagai pembangkitan siaga yang memberi keuntungan pada sistem tenaga listrik sebagai sumber energi pada beban puncak, kehilangan daya pada sistem dan meningkatkan kualitas daya para konsumen. Beberapa perkembangan terus dilakukan dan membuat DG tidak hanya mungkin dilakukan tetapi suatu potensi yang diharapkan.

Perkembangan DG di masa sekarang didukung oleh dua isu utama dalam sistem tenaga listrik pada masa sekarang yaitu :

1. Perubahan kebijakan energi listrik di seluruh dunia dari sistem monopoli menjadi sistem yang lebih kompetitif terkhusus pada sektor pembangkit yang memungkinkan keragaman dalam kepemilikan aset pembangkit sehingga

akan adanya persaingan yang mendorong harga energi listrik menjadi lebih murah.

2. Kebijakan lingkungan yang berkelanjutan yang mengharapakan DG dapat membantu mengurangi gas emisi terutama emisi karbon. Pemanfaatan energi DG harus mendorong pengurangan emisi karbon karena umumnya teknologi DG memiliki emisi karbon yang rendah bahkan ada yang emisi karbonnya nol seperti *photovoltaic* (sel surya) .

#### **2.4.2 Defenisi Distributed Generation**

CIGRE telah mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai semua unit pembangkit dengan kapasitas maksimal berkisar sampai 50 MW dan dipasangkan ke jaringan distribusi. IEEE mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai pembangkitan yang menghasilkan energi dalam kapasitas yang lebih kecil dibandingkan pusat-pusat pembangkit konvensional dan dapat dipasangkan hampir pada setiap titik sistem tenaga listrik. IEA (2002) mendefinisikan *Distributed Generation* sebagai unit-unit yang menghasilkan energi pada sisi konsumen atau dalam jaringan distribusi lokal. Semua definisi di atas menunjukkan bahwa pembangkitan dengan skala kecil yang dihubungkan ke jaringan distribusi dapat dianggap sebagai bagian dari DG. Selain itu, pembangkitan yang dipasangkan dekat dengan sisi beban atau konsumen juga dapat dikatakan sebagai *Distributed Generation*.

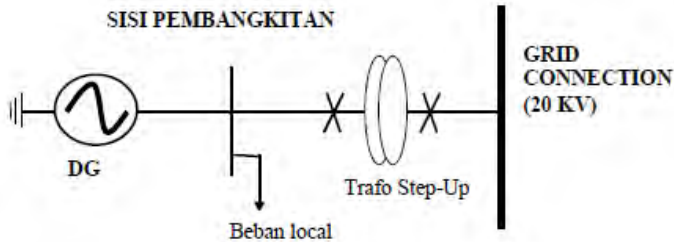
#### **2.4.3 Teknologi DG yang Dapat Dikembangkan di Indonesia**

Beberapa jenis teknologi DG yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah mikrohidro, bahan bakar nabati, biomassa, energi angin, tenaga surya, energi hybrid (angin dan surya), pasang surut, dan panas bumi. Secara garis besar, interkoneksi pada DG terbagi atas tiga komponen, yaitu:

##### **1. Sumber Energi Utama (Prime Energy Source)**

Hal ini menunjuk pada teknologi DG sebagai sumber energi seperti energi surya, angin, mikrohidro, pasang surut dan biomassa. Setiap teknologi DG memiliki karakter yang berbeda-beda dalam menghasilkan energi, misalnya tipikal energi yang dihasilkan oleh PV dan *fuel cell* berupa *direct current* atau *wind turbin* yang tipikal

energinya berupa energi mekanis (dihasilkan dari putaran pada turbin).



**Gambar 2.10** Interkoneksi DG

## 2. Power Converter

Power converter dalam interkoneksi, berfungsi untuk mengubah energi dari sumber energi utama (*prime energy resources*) menjadi energi dengan level frekuensi tertentu (50Hz - 60Hz). Secara garis besar, ada 3 kategori power converter yang digunakan dalam interkoneksi, yaitu :

1. Generator sinkron
2. Generator induksi
3. Static power converter

Generator sinkron dan generator induksi mengkonversi putaran energi mekanis ke dalam tenaga listrik dan sering disebut dengan *routing power converter*. *Static power converter* (biasa dikenal dengan inverter) tersusun atas *solid-device* seperti transistor. Pada inverter, transistor mengkonversi energi dari sumber menjadi energi dengan frekuensi 50-60Hz dengan *switching (switch on-off)*. Teknologi DG yang dijual di pasaran, kebanyakan telah diintegrasikan dengan *power converter* masing-masing. Misalnya *fuel cell* yang telah diintegrasikan dengan inverter. *Power converter* memiliki efek yang besar terhadap DG pada sistem distribusi. Oleh sebab itu dibutuhkan peralatan interkoneksi untuk menjamin keamanan dan kestabilan operasi. Generator sinkron, generator induksi dan inverter memberikan respon yang sangat berbeda terhadap variasi kondisi dari sistem tenaga.

## 3. Sistem Interface dan Peralatan Proteksi

Peralatan ini ditempatkan sebagai penghubung antara terminal output dari power converter dan jaringan primer. Komponen interkoneksi ini biasanya terdiri atas *step-up transformer*, *metering* kadang ditambahkan *controller* dan relay proteksi. Dalam komponen ini terkadang terdapat *communication link* untuk mengontrol kondisi pada sistem.

Beberapa permasalahan teknis yang berhubungan dengan DG dapat memberikan beberapa variasi yang signifikan terhadap kapasitas pembangkitan dari DG itu sendiri. Oleh karena itu, perlu diperkenalkan pengkategorian yang tepat untuk mengklasifikasikan DG berdasarkan kapasitas pembangkitan yang dimilikinya. Terdapat empat jenis DG berdasarkan klasifikasi ini, yaitu :

**Tabel 2.3** Klasifikasi DG berdasarkan Kapasitas Pembangkitan

<b>Jenis DG</b>	<b>Kapasitas Pembangkitan</b>
Micro DG (DG Mikro)	1 Watt – 5Kw
Small DG (DG Kecil)	5kW – 5MW
Medium DG (DG sedang)	5MW – 50 MW
Large DG (DG Besar)	50MW – 300 MW

Teknologi yang digunakan untuk DG tidak memiliki relevansi yang signifikan terhadap tujuan pendefinisian DG. Perkembangan teknologi yang begitu pesat menyebabkan sangat bervariasinya metode pembangkitan yang dimiliki oleh DG itu sendiri.

Teknologi DG yang sering digunakan adalah micro-hydro, panel surya, turbin angin, mesin diesel, sel bahan bakar, dan baterai yang terdiri dari sejumlah modul-modul kecil dan dirakit secara tersendiri oleh pabrik. Hal ini dilakukan untuk mempermudah konstruksi dan implementasi pada lokasi DG. Modul-modul kecil tersebut dapat dipasang dengan sangat cepat pada lokasi akhir dimana pembangkit membutuhkan penghematan waktu yang sangat signifikan bila dibandingkan dengan pembangunan pembangkit tenaga listrik besar yang letaknya terpusat pada suatu lokasi tertentu.

Modul-modul DG tersebut dapat cepat beroperasi segera setelah dipasang pada lokasi. Masing-masing modul juga bersifat independen, jadi ketika satu modul mengalami kerusakan, maka modul yang lain dapat tetap bekerja secara normal. Hal inilah yang menyebabkan nilai keadaan unit DG yang lebih baik dibandingkan dengan pembangkit sentral pada umumnya.

Berdasarkan teknologi pembangkitan yang digunakan[3], DG dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

**Tabel 2.4** Klasifikasi DG berdasarkan Teknologi pembangkitan

Teknologi DG	Kapasitas per Modul
Fossil Fuel	
Combined Cycle Gas Turbine (CCGT)	35-400 MW
Internal combustion engines	5 kW-10 MW
Combustion turbine	1-250 MW
Micro-Turbines	35 kW-1 MW
Renewable Resources	
Small hydro	1-100 MW
Micro hydro	25 kW-1 MW
Wind turbine	200 Watt-3 MW
Photovoltaic arrays	20 Watt-100 kW
Solar terminal, central receiver	1-10 MW
Solar terminal, Lutz system	10-80 MW
Biomass, e.g. based on gastification	100 kW-20 MW
Fuel cells, phosacid	200 kW-2 MW
Fuel cells, solid oxide	250 kW-2 MW
Geothermal	5-100 MW
Ocean energy	100 kW – 1 MW
Stirling engine	2 – 10 kW
Battery storage	500kW – 5 MW

#### 2.4.4 Keuntungan Distributed Generation

Dalam banyak penelitian, DG dapat beradaptasi dengan perubahan ekonomi dalam cara yang fleksibel karena ukurannya yang kecil dan konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dengan pusat-pusat pembangkit konvensional. Menurut IEA, penilaian ekonomi atas nilai fleksibilitas DG sangat memungkinkan dan layak (2002). Sebagian besar DG memang sangat fleksibel dalam beberapa hal seperti operasi, ukuran, dan kemajuan teknologi. Selain itu, DG dapat meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik. Dalam pemasangannya di jaringan distribusi, DG ditempatkan dekat dengan daerah beban dan beberapa keuntungan dalam pemakaian DG :

1. DG memberi keandalan yang lebih tinggi dalam pemanfaatan daya
2. DG sebagai sumber energi lokal dapat membantu untuk penghematan daya
3. Dibandingkan dengan *power plants*, DG memiliki efisiensi yang lebih tinggi dalam penyaluran daya. Selain itu, bila dikoneksikan pada jaringan, DG dapat meningkatkan efisiensi sistem karena DG membantu mengurangi rugi-rugi pada sistem.
4. Dalam memproduksi energi listrik, DG bersifat ramah lingkungan. Emisi yang dihasilkan dari produksi energi listrik oleh DG tergolong rendah, bahkan mendekati nol

## 2.5 Sistem Kelistrikan *Microgrid*

*Microgrid* atau jaringan kelistrikan mikro merupakan suatu bentuk kelistrikan yang banyak dikembangkan, karena mampu mengurangi rugi-rugi transmisi. Semakin lama beban akan semakin naik maka rugi-rugi saluran transmisi semakin besar dan salah satu solusinya adalah dengan pembangkitan tersebar seperti yang ada pada jaringan *microgrid*.

Selain itu tingkat kehandalan juga akan semakin naik dengan adanya suatu jaringan kelistrikan mikro yang tersebar. Ditambah lagi dengan jaringan *microgrid* ini memanfaatkan sumber energi terbarukan untuk menambah pembangkit dalam mensupply kebutuhan beban sehingga dapat mengurangi biaya pembangkitan.

### 2.5.1 Pembangkitan *Microgrid*

Perbedaan jaringan *microgrid* dengan kelistrikan konvensional yang menonjol adalah pembangkitan listriknya. *Microgrid* menggunakan teknologi dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Teknologi pembangkitan *microgrid* diantaranya yaitu *photovoltaic* (PV), turbin angin (*wind turbine*), *fuel cel*, *micro turbine* dan baterai serta diesel generator sebagai *backup* saat beban naik. Berikut adalah pembangkit yang digunakan pada tugas akhir ini :



### 2.5.1.1 Photovoltaic

*Photovoltaic*(PV) merupakan pembangkit sumber energi terbarukan yang mampu merubah cahaya sinar matahari menjadi energi listrik. Dengan kata lain, PV adalah teknologi berdasarkan semi-konduktor dalam kondisi padat yang mengkonversi energi cahaya matahari secara langsung menjadi energi listrik, tanpa ada bagian yang berputar, tidak mengeluarkan gas buangan, PV juga merupakan pembangkit yang sangat menarik dan cocok digunakan untuk pembangkit pada jaringan distribusi perkotaan dikarenakan ukurannya yang relatif kecil dan tidak ada kebisingan saat dioperasikan.

Karakteristik dari PV pada saat beroperasi tidak selalu sama dengan kondisi standar ( $1000 \text{ W/m}^2$ , suhu sel  $25^\circ\text{C}$ ) maka pengaruh radiasi dan suhu akan mempengaruhi karakteristik PV. Pengaruh intensitas matahari dimodelkan dengan mempertimbangkan output daya dari modul sel surya yang akan sebanding dengan radiasinya. Modul sel surya diuji dalam *Standard Test Condition (STC)*. Daya keluaran dari modul sel surya dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{PV} = M \{ P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} (1 + k(T_C - T_r)) \} \quad (2.20)$$

dimana :

$P_{PV}$	adalah daya keluaran dari modul saat radiasi
$G_{ING}(W)$	
$P_{STC}$	adalah daya maksimum modul saat <i>STC</i> ( $W$ )
$G_{ING}$	adalah radiasi aktual ( $W/m^2$ )
$G_{STC}$	adalah radiasi saat <i>STC</i> ( $1000 \text{ W/m}^2$ )
$M$	adalah jumlah modul PV
$k$	adalah koefisien suhu untuk daya modul dalam %/ $^\circ\text{C}$
$T_C$	adalah suhu sel dalam $^\circ\text{C}$
$T_r$	adalah referensi suhu ( $25^\circ\text{C}$ )

Dalam tugas akhir ini, digunakan modul sel surya SOLAREX MSX-83. Karakteristik dari modul ini yaitu [10] :

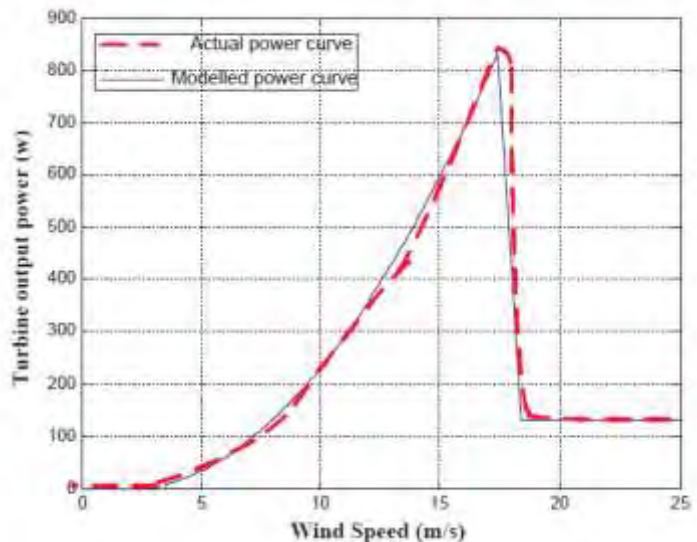
Daya maksimum saat <i>STC</i> ( $P_{STC}$ )	= 83 W
Tegangan saat daya maksimum	= 17.1 V
Arus saat daya maksimum	= 4.85 A

Arus *short-circuit* saat STC = 5.27 A  
 Tegangan *open-circuit* saat STC = 21.2 V  
 Koefisien suhu untuk daya ( $k$ ) = -0.5

### 2.5.1.2 Turbin Angin (*Wind Turbine*)

Pembangkit turbin angin merupakan suatu sistem yang mengubah angin menjadi energi listrik. Angin yang berhembus akan menggerakkan kipas yang di kopel dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik. Dalam permodelan turbin angin, terdapat dua hal penting yang harus diperhitungkan yaitu ketersediaan angin dan kurva daya dari turbin angin itu sendiri. Keluaran daya dari turbin angin merupakan fungsi dari kecepatan angin. Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, kurva daya harus diperoleh.

Dalam tugas akhir ini, digunakan turbin angin AIR403. Kurva daya dari turbin angin ini adalah sebagai berikut [13]:



**Gambar 2.11** Kurva daya aktual dan modelnya dari AIR403

Dari model kurva daya tersebut, dapat diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P_{WT} = 0, V_{ac} < V_{ci} \quad (2.2)$$

$$P_{WT} = aV_{ac}^2 + bV_{ac} + c, \quad V_{ci} \leq V_{ac} < V_r \quad (2.21)$$

$$P_{WT,r} = 130, \quad V_r \leq V_{ac} < V_{co} \quad (2.22)$$

$$P_{WT} = J \times P_{WT,r} \quad (2.23)$$

dimana :

$P_{WT}$  adalah daya keluaran dari turbin angin ( $W$ )

$P_{WT,r}$  adalah *rating* daya ( $W$ )

$J$  adalah jumlah turbin angin terpasang

$V_{ci}$  adalah kecepatan *cut-in*( $m/s$ )

$V_{co}$  adalah kecepatan *cut-out*( $m/s$ )

$V_r$  adalah *rating* kecepatan angin ( $m/s$ )

$V_{ac}$  adalah kecepatan angin aktual ( $m/s$ )

Untuk memodelkan performansi dari turbin angin, persamaan matematis dari kurva daya harus diperoleh. Berdasarkan kurva diatas, didapatkan parameter sebagai berikut [10]:

$$a = 3.4$$

$$b = -12$$

$$c = 9.2$$

$$P_{wt,r} = 130$$

$$V_{ci} = 3.5$$

$$V_{co} = 18$$

$$V_r = 17.5$$

### 2.5.1.3 Diesel Generator

Diesel generator merupakan pembangkit yang sudah dikembangkan lebih dari 100 tahun yang lalu. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar fosil yang artinya bukan termasuk pada pembangkit energi terbarukan. Sehingga pada jaringan *microgrid* ini, diesel generator akan dinyalakan terakhir pada saat tidak ada *renewable energy* dan atau pembangkitan dari *renewable* kurang untuk menanggung beban. Meski begitu pembangkit ini banyak digunakan karena memiliki instalasi yang mudah dan keandalan yang tinggi.

Diesel generator adalah jenis yang paling umum digunakan dalam teknologi *microgrid* saat ini. Biaya operasi

dari sistem dapat dinyatakan sebagai fungsi daya keluaran dan dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat. Biaya operasi untuk diesel generator adalah sebagai berikut :

$$CF(P_{DG}) = (a + bP_{DG} + cP_{DG}^2) * R \quad (2.24)$$

dimana :

$CF(P_{DG})$  adalah total biaya operasi diesel generator (R/h)

$R$  adalah harga bahan bakar (Rupiah/liter)

$a$ ,  $b$ , dan  $c$  adalah koefisien diesel generator

$P_{DG}$  adalah keluaran daya dari diesel generator ( $kW$ )

#### 2.5.1.4 Baterai

Sebuah media penyimpan energi pada sistem kelistrikan *microgrid* merupakan bagian utama karena sifat dari energi terbarukan yang berubah-ubah dan tidak menentu, tetapi sering dilupakan rugi-rugi tentang umur baterainya. Padahal biaya yang dikeluarkan untuk instalasi baterai cukup mahal. Sehingga keawetan dari baterai merupakan hal yang penting untuk dilakukan optimasi.

Strategi yang dilakukan untuk melakukan penghematan adalah mengatur penggunaan baterainya, hal tersebut juga akan berimbas pada kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan. Pada setiap waktu *state of charge* (SOC) dari baterai harus memenuhi persyaratan berikut :

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (2.25)$$

Dimana  $SOC_{max}$  adalah batas atas yang diperbolehkan dari kapasitas baterai, dan  $SOC_{min}$  adalah batas minimal dari kapasitas baterai.

$$P_{cha\_max} \leq P_{bat} \leq P_{disc\_ha\_max} \quad (2.26)$$

Dimana  $P_{cha\_max}$  adalah daya maksimum yang diperbolehkan pada saat *charging* baterai dan  $P_{discha\_max}$  adalah daya maksimum yang diperbolehkan pada saat baterai *discharging*. Sedangkan  $P_{bat}$  merupakan daya baterai, dimana

$P_{bat}$  akan bernilai positif saat *discharging* dan bernilai negatif pada saat *charging*.

Besar nilai SOC pada waktu tertentu ditentukan oleh SOC awal dan daya baterai selama periode tersebut. Secara matematis ditunjukkan seperti berikut :

$$SOC_{(t+\Delta t)} = SOC_t - P_{bat} \times \frac{\Delta t}{C_{bat}} \quad (2.27)$$

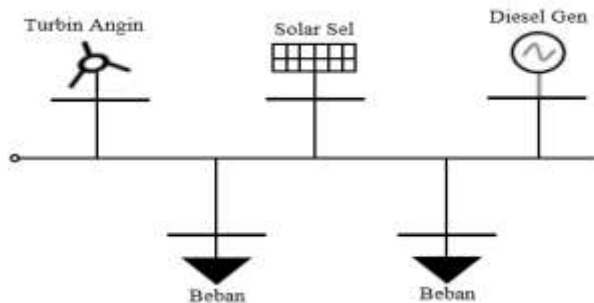
$P_{bat}$ -t adalah daya baterai selama waktu  $t$  sampai dengan  $(t + \Delta t)$  dan  $C_{bat}$  adalah kapasitas dari baterai yang digunakan. Nilai SOC harus diantara nilai minimum dan maksimumnya.

### 2.5.2 Mode Operasi *Microgrid*

Pada sistem kelistrikan microgrid ada dua mode operasi yang umum digunakan, yakni operasi *Stand-alone*(*Off grid*) dan *Grid connected* (*On Grid*). Dimana kedua mode tersebut dapat diuraikan sebagai berikut :

#### 2.5.2.1 *Stand-alone* (*Off Grid*)

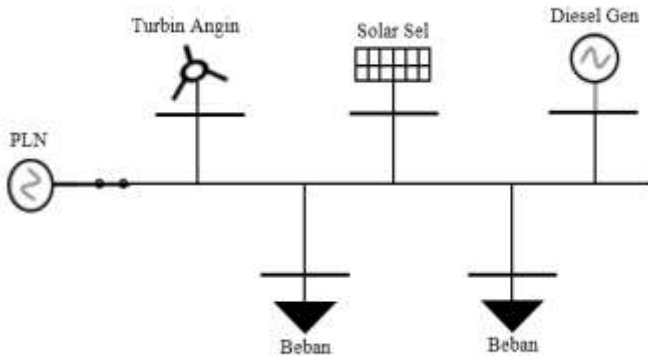
Mode operasi *Stand-alone microgrid* (*Off Grid*) merupakan mode operasi dimana sistem kelistrikan tidak terhubung pada main grid (PLN). Pembangkit yang ada beroperasi secara mandiri dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada stabilitas sistem terutama frekuensi dan tegangan.



**Gambar 2.12** Tipe *micro grid stand-alone*

### 2.5.2.2 Grid Connected (On Grid)

Mode operasi *Grid-connected* merupakan mode operasi dimana sistem terhubung ke main grid (PLN). Pembangkit yang ada beroperasi bersama dengan PLN dalam memenuhi kebutuhan sistem. Mode operasi ini menekankan pada minimisasi harga import dari PCC (*Point of Common Coupling*), meningkatkan *power factor* di PCC dan optimisasi profil tegangan sistem.



**Gambar 2.13** Tipe *grid-connected* pada *micro grid*

## 2.6 Standar Batas Rugi Tegangan dan Daya

### A. Tegangan

Pada tugas akhir ini digunakan standar pada IEC 60038 Edisi 6.2 2002-07 hal 11 yang menunjukkan bahwa batas tegangan yang digunakan adalah  $\pm 10\%$  dari tegangan referensi (*slack bus*).

### B. Daya

Melakukan pemasangan DG adalah berfungsi untuk mengurangi losses daya pada jaringan. Digunakan standar yang didapat pada hand out AST 1 hal 14 Prof.Ir. Ontoseno Penangsang ,M.Sc.,Ph.D. yaitu 6-8%.

## **BAB 3**

### **Particle Swarm Optmization, ZBR/K-Matriks, dan Konfigurasi IEEE 34 Bus Radial**

#### **3.1 Teori Particle Swarm Optimization**

Pertama kali algoritma Particle Swarm Optimization diperkenalkan oleh Dr. Kennedy dan Dr. Eberhart pada tahun 1995[5]. Dasar ide algoritma tersebut terinspirasi dari perilaku sosial hewan. Perilaku sosial berupa proses alami untuk saling berkomunikasi dalam berbagi pengetahuan individu ketika mencari makanan dan bermigrasi pada suatu kelompok seperti sekelompok burung, sekelompok lebah dan sebagainya. Saat salah satu anggota mendapatkan jalur yang diinginkan maka sisa anggota lain akan mengikuti secara cepat[6].

Particle swarm optimization (PSO) merupakan algoritma untuk mencari nilai fungsi minimum atau maksimum berdasarkan oleh populasi baru. PSO memiliki kelebihan dalam mencari nilai optimasi non-linear yang kompleks. Particle swarm optimization terbukti dapat menemukan solusi terbaik pada masalah optimisasi. Algoritma PSO dapat diaplikasikan untuk mendapatkan posisi sensor pada weighted least squares state estimation. Optimisasi untuk WLS dapat digunakan dalam penentuan minimum penempatan sensor sehingga didapatkan estimasi yang cukup akurat. Pada algoritma PSO terdapat model untuk mendapatkan nilai optimasi salah satunya Global Best PSO.

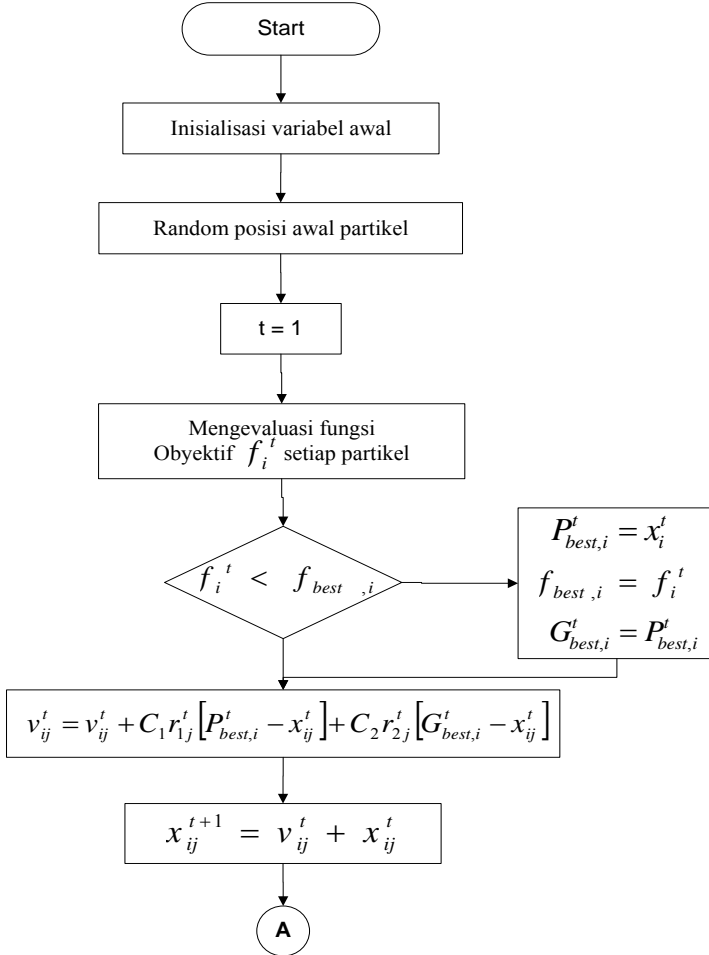
##### **3.1.1 Global Best PSO**

Metode global best PSO adalah metode yang posisi partikel dipengaruhi oleh partikel yang memiliki nilai terbaik pada sekumpulan partikel. Setiap partikel [4] memiliki posisi pada suatu ruang dan nilai pergerakan. Formula optimalisasi untuk mendapatkan minimal penempatan sensor :

$$\text{Min} \sum_{k=1}^n \{G_{best,j}^k\} \quad (3.1)$$

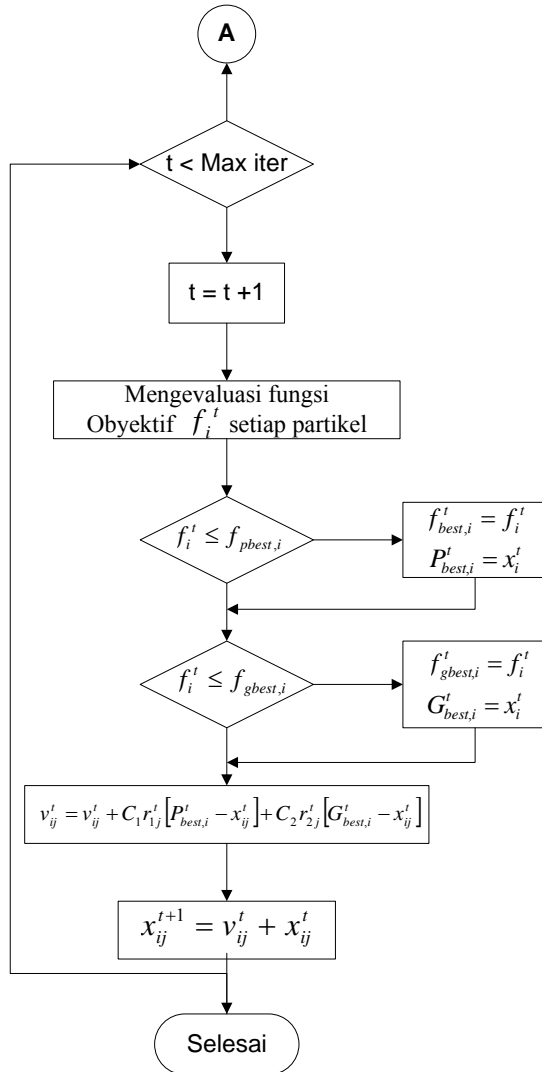
Optimal penempatan sensor didapatkan dari minimum penempatan sensor dari partikel terbaik secara global ( $G_{best,j}^k$ ). Pada sistem state estimation jaringan distribusi akan dioptimisasi penempatan minimum sensor tetapi tetap mendapatkan nilai

estimasi tegangan yang cukup akurat. Langkah – langkah untuk mendapatkan optimisasi[6] tersebut digambarkan pada diagram alir Gambar 3.1



**Gambar 3.1** Diagram alir PSO





**Gambar 3.1** Diagram alir PSO (lanjutan)

### 3.1.2 Inisialisasi Variabel Awal, Input Data PSO dan Proses Iterasi PSO

Variabel awal dan input data diperlukan untuk memulai algoritma PSO. Data yang harus didefinisikan antara lain :

1. Inisialisasi berupa jumlah partikel akan dipakai pada PSO, inisialisasi dan jumlah iterasi (  $k$  ), nilai koefisien akselerasi (  $c1$  dan  $c2$  ), beban maksimum (  $w_{\max}$  ) dan beban minimum partikel (  $w_{\min}$  ).
2. Posisi awal partikel (  $x_{ij}^0$  ) berupa nilai random sesuai besar dimensi pada setiap partikel.
3. Kecepatan awal partikel (  $v_{ij}^0$  ) berupa nilai nol.

Dataposisi partikel (  $x_{ij}^t$  ) berupa matriks yang memiliki dimensi. Matrik posisi partikel memiliki dimensi yang dibentuk dari jumlah data tiap partikel (  $m$  ) dan jumlah partikel pada swarm (  $n$  ). Nilai data setiap partikel didapatkan secara random sesuai dimensi. Matriks akan ditunjukkan pada persamaan 3.2.

$$x_{ij}^k = \begin{bmatrix} x_{11}^k & x_{12}^k & \dots & x_{1m}^k \\ x_{21}^k & \dots & \dots & x_{2m}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1}^k & \dots & \dots & x_{nm}^k \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Nilai posisi partikel diperbarui pada setiap iterasi dengan dipengaruhi nilai velocity (  $v_i^{k+1}$  ). Nilai velocity didapatkan dari pengalaman partikel (  $x_i^k$  ) dan pengalaman yang diperoleh oleh partikel lain pada group (  $P_{best,i}^k$  dan  $G_{best,i}^k$  ). Velocity setiap partikel diperoleh dengan persamaan 3.3.

$$v_i^{k+1} = w^k \times v_i^k + c1 \times rand_1 \times (P_{best,i}^k - x_i^k) + c2 \times rand_2 \times (G_{best,i}^k - x_i^k) \quad (3.3)$$

Pengalaman partikel lain berupa partikel terbaik setiap iterasi  $P_{best,i}^k$  dan partikel terbaik pada interval iterasi  $G_{best,i}^k$  akan sangat mempengaruhi pergerakan partikel. Koefisien akselerasi (  $c1$  dan  $c2$  ) berdampak besar kontribusi partikel  $P_{best,i}^k$  dan  $G_{best,i}^k$  terhadap velocity partikel. Kondisi nilai  $c1$

lebih besar dibanding  $c2$  maka kontribusi partikel  $P_{best,i}^k$  lebih besar dan sebaliknya.

Nilai inersia ( $w^k$ ) akan selalu berubah pada setiap iterasi. Perubahan nilai akan dipengaruhi jumlah iterasi dan nilai beban inersia maksimum dan minimum ( $w_{max}$  dan  $w_{min}$ ). Beban inersia memiliki interval sebesar perbedaan beban inersia maksimum dengan beban inersia minimum. Nilai beban inersia setiap iterasi diperoleh dengan persamaan 3.4 dibawah ini.

$$w^k = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{w_{max}} \times k \quad (3.4)$$

Setiap pergantian iterasi maka posisi partikel baru ( $x_j^{k+1}$ ) didapatkan dengan menjumlahkan posisi partikel pada iterasi sebelumnya ( $x_j^k$ ) dengan velocity ( $v_j^{k+1}$ ). Nilai posisi pada setiap iterasi diperbarui dengan persamaan 3.5 dibawah ini.

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1} \quad (3.5)$$

Nilai personal best ( $P_{bestj}^k$ ) didapatkan dengan mencari nilai minimum penempatan sensor yang memiliki error pengukuran yang cukup akurat pada setiap iterasi. Partikel yang memiliki jumlah sensor paling minimum menjadi nilai personal best sesuai dengan perhitungan 3.6 dan 3.7 dibawah.

$$f(x_j^k) = \text{sum}(x_j^k) \quad (3.6)$$

$$P_{bestj}^{k+1} = \begin{cases} P_{bestj}^k & \text{if } f(x_j^{k+1}) > f_{pbestj}^k \\ x_j^{k+1} & \text{if } f(x_j^{k+1}) < f_{pbestj}^k \end{cases} \quad (3.7)$$

Nilai global best  $G_{bestj}^k$  didapatkan dengan mencari minimum penempatan sensor antara  $P_{best}$  iterasi ke-k dengan global best iterasi k-1.  $G_{bestj}^k$  diganti dengan global best baru saat didapatkan fungsi hasil  $P_{best}$  pada setiap iterasi lebih minimum dibandingkan  $G_{best}$  iterasi sebelumnya. Nilai  $G_{best}$  dirumuskan pada persamaan 3.8.

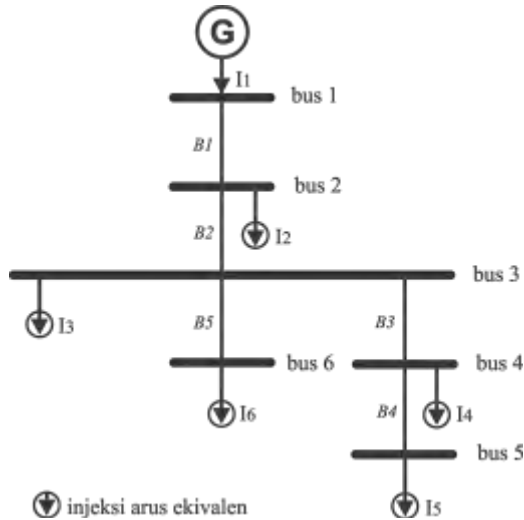
$$G_{bestj}^k = \min\{P_{pbest}^t\} \quad (3.8)$$

## 3.2 Metode K-Matrik dan $Z_{BR}$

Dalam perkembangan analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode *forward-backward*, terdapat beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk menambah kekakuratan[7], kemudahan dan kecepatan perhitungan analisis. Sehingga hasil nilai yang didapatkan dapat digunakan untuk melakukan analisa dan optimasi. Terutama untuk dapat mengakomodir sistem tiga fasa dalam keadaan tidak seimbang, maka perlu adanya rekayasa perhitungan secara matematik menggunakan beberapa cara kalkulasi dan pemodelan sistem.

### 3.2.1 Metode $Z_{BR}$

Untuk melakukan analisis aliran daya sistem distribusi dengan sistem yang kompleks menggunakan metode *forward-backward*, diperlukan modifikasi perhitungan untuk memudahkan proses iterasi dan membentuk persamaan. Salah satu metode yang dikembangkan adalah metode  $Z_{BR}$ . Metode  $Z_{BR}$  adalah metode yang digunakan untuk membentuk persamaan aliran daya dengan menyusun impedansi saluran distribusi radial dalam suatu matrik untuk menghitung drop tegangan. Sebelum membentuk matrik  $Z_{BR}$ , digunakan metode *network topology* untuk mendapatkan persamaan analisis aliran daya. Maka dari analisis ini didapatkan nilai yang diperlukan dalam perhitungan. Beberapa hasil perhitungan yang diperlukan adalah tegangan, arus, dan rugi daya. Setelah itu bisa dilakukan optimasi sesuai yang diinginkan dari hasil penelitian ini. Salah satu contoh pembentukan persamaan aliran daya adalah sebagai berikut :



**Gambar 3.3** Single line diagram contoh analisis menggunakan metode *network topology*

Sebuah sistem distribusi sederhana dengan model rangkaian radial murni disuplai dari satu sumber pada *infinite bus* menyuplai beban yang tersebar dengan jalur tertentu. Maka didapatkan persamaan sederhana sebagai berikut :

$$B_5 = I_6$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan injeksi arus ke bus di atas dapat diringkas perhitungan selanjutnya dengan menggunakan matrik.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Persamaan matrik di atas dapat dirumuskan menjadi model persamaan dengan komponen matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*).

$$[B] = [BIBC][I]$$

Kemudian dibentuk persamaan untuk mencari nilai drop tegangan berdasarkan jalur injeksi arusnya.

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Maka drop tegangan dapat dihitung menjadi sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45} - B_5 \cdot Z_{26}$$

Persamaan di atas dapat dibentuk dan diselesaikan menggunakan suatu bentuk matrik dengan komponen matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

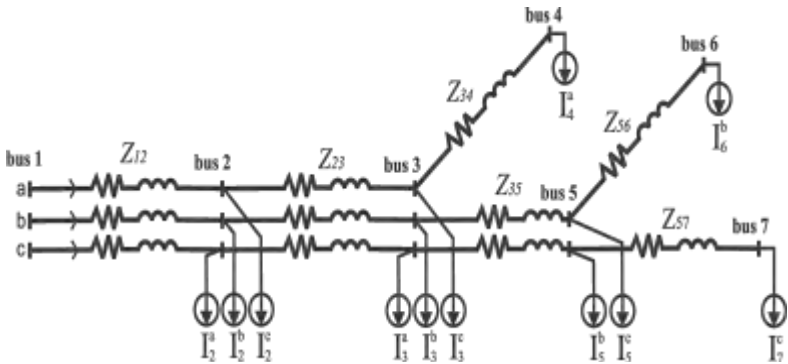
$$[\Delta V] = [BCBV][B]$$

Sehingga, untuk mendapatkan nilai  $\Delta V$  didapatkan persamaan akhir sebagai berikut :

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I]$$

$$[\Delta V] = [DLF][I]$$

Untuk melakukan analisis aliran daya tiga fasa, persamaan disusun dengan langkah-langkah yang sama. Untuk metode  $Z_{BR}$ , cara menghitung drop tegangan dilakukan per fasa dengan mengubah dimensi matrik menjadi 3 kali lipat karena digunakan untuk menghitung 3 rangkaian fasa. Matrik  $Z_{BR}$  merupakan matrik yang merepresentasikan impedansi saluran tiga fasa yang dibentuk dengan menelusuri jalur arus mengalir ke beban dan dikonversikan ke dalam matrik sesuai dengan nilai impedansi.



**Gambar 3.4** Contoh rangkaian 3 fasa untuk membentuk matrik  $Z_{br}$

Dari contoh rangkaian 3 fasa di atas, dapat dibentuk matrik untuk menghitung injeksi arus menggunakan matrik BCBV.

$$Z_{BR} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_a \\ Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_a \\ 0 & \begin{bmatrix} Z_b & 0 \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} \end{bmatrix} & 0 & 0 & 0 \\ \begin{bmatrix} Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} & 0 & \begin{bmatrix} Z_b \\ Z_c \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Z_b \\ 0 & Z_c \end{bmatrix} & 0 \end{bmatrix}$$

### 3.2.2 Metode K-matrik

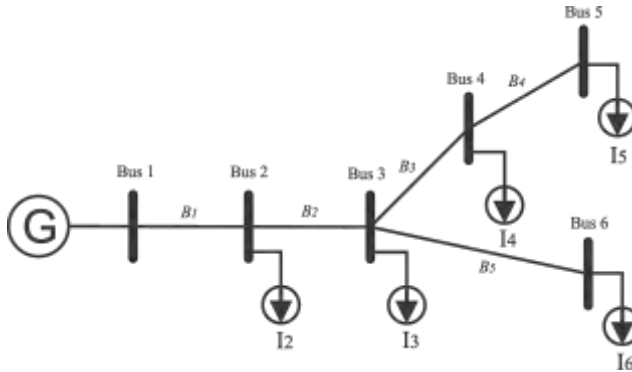
Analisis aliran daya pada sistem distribusi menggunakan metode *forward-backward* memiliki keefektifan dalam menghitung nilai tegangan pada tiap bus. Namun, apabila diterapkan dalam sistem yang kompleks dan rumit dibutuhkan metode pengembangan lebih lanjut. Metode  $Z_{BR}$  merupakan metode pengembangan yang dapat memudahkan analisis untuk melakukan studi aliran daya. Dengan menyederhanakan pembentukan matrik impedansi saluran distribusi dapat mempercepat perhitungan studi aliran daya. Namun apabila metode  $Z_{BR}$  digunakan untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem tiga fasa, diperlukan satu matrik yang digunakan untuk mendefinisikan jalur saluran tiga fasa. Misalkan dalam satu bus hanya terdapat dua fasa atau hanya satu fasa diperlukan pendefinisian manakah fasa yang hilang dalam bus tersebut.

Metode K-matrik merupakan metode pembentukan matrik impedansi dengan melakukan penelusuran alur/*path* saluran distribusi. Jalur saluran distribusi direpresentasikan dalam sebuah matrik yang menunjukkan arah arus injeksi dari suatu bus ke bus yang lain. Gambar di bawah adalah single line diagram untuk sistem yang sama dengan contoh single line diagram pada analisis aliran daya menggunakan metode  $Z_{BR}$ . Untuk membentuk K-matrik digunakan aturan penelusuran jalur.

- $kij = 1$ , jika cabang  $i$  berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi dan memiliki arah yang sama



- $k_{ij} = -1$ , jika cabang  $i$  berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi dan memiliki arah yang berlawanan
- $k_{ij} = 0$ , jika cabang  $i$  tidak berada pada jalur antara bus  $j$  dan bus referensi



**Gambar 3.5** Single line diagram contoh analisis menggunakan metode K-matrik

Maka untuk contoh single line diagram di atas, K-matrik-nya adalah :

$$\begin{matrix}
 & \text{bus2} & \text{bus3} & \text{bus4} & \text{bus5} & \text{bus6} \\
 \begin{matrix} B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}
 \end{matrix}$$

Pada contoh sebelumnya, dapat disimpulkan persamaan menghitung drop tegangan.

$$[\Delta V] = [BCBV][BIBC][I]$$

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}$$

Apabila kita amati bentuk dan komposisi dari matrik BIBC, terdapat persamaan komposisi matrik. Matrik BIBC memiliki komponen yang nilainya berlawanan dengan setiap komponen K-matrik. Sehingga dapat dirumuskan hubungan antara K-matrik dan BIBC sebagai berikut ;

$$[BIBC] = -[K - \text{matrik}]$$

Sedangkan bila matrik BIBC kita transpose komposisinya maka akan terbentuk matrik yang berkorelasi dengan matrik BCBV.

$$BIBC' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Apabila matrik BIBC' dikalikan per komponen (perkalian dot) dengan matrik impedansi *full branch*, maka akan didapatkan matrik BCBV.

$$BCBV = -[K - \text{matrik}]' \cdot [ZF_{BR}]'$$

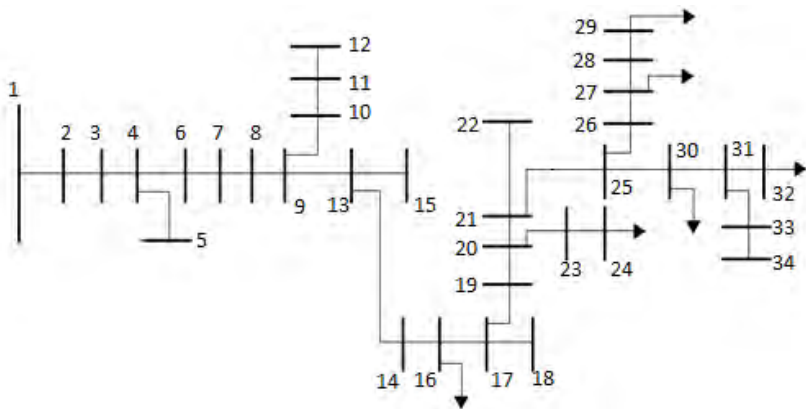
$$BCBV = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & Z_{36} \end{bmatrix}$$

Sehingga, untuk metode K-matrik dapat disimpulkan formula mencari drop tegangan di tiap saluran.

$$[\Delta V] = -[K] \times -[K]' \cdot [ZF_{BR}] \times [$$

### 3.3 IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder

IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder menggunakan sistem 50Hz, 20KV, 12MVA, dengan berbagai macam jenis beban yang terhubung ke *substation* utama. Berbagai jenis beban tersebut meliputi *Constant-Resistance Load*, *Constant-Energy Load*, *Constant-Power Load*, dan *Constant-Current Load*. Keseluruhan konfigurasi ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 3.6** Konfigurasi IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder

Berikut informasi tentang data impedansi saluran dan data beban dalam Konfigurasi IEEE 34 Bus Radial Distribution Feeder

**Tabel 3.1** Overhead Line Configuration

Configuration	Z (R + jX) in ohms per mile
300	$1.3368 + j1.3343$
301	$1.9300 + j1.4115$
302	$2.7995 + j1.4855$
303	$2.7995 + j1.4855$
304	$1.9217 + j1.4212$

**Tabel 3.2***Line Segment Data*

Node A	Node B	Length (ft)	Configuration
1	2	2580	300
2	3	1730	300
3	4	32230	300
4	5	5804	303
4	6	37500	300
6	7	29730	300
7	8	10	301
9	10	1710	302
9	13	10210	301
10	11	48150	302
11	12	13740	302
13	15	3030	303
13	14	840	301
14	16	20440	301
16	17	520	301
20	21	4900	301
20	23	209	300
25	30	2020	301
25	26	280	301
31	32	860	301
31	33	280	301
26	27	1350	301
27	28	3640	301
28	29	530	301
8	9	310	301
19	20	10	301
17	18	23330	303
17	19	36830	301
21	22	1620	302
21	25	5830	301
30	31	2680	301

### 3.2 Line Segment Data (Lanjutan)

Node A	Node B	Length (ft)	Configuration
33	34	4860	304
23	24	10560	300

**Tabel 3.3** Spot Load Data

Bus	Load Model	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
30	3	20	16	20	16	20	16
32	2	9	7	9	7	9	7
27	3	135	105	135	105	135	105
29	1	20	16	20	16	20	16
24	1	150	75	150	75	150	75
16	2	10	5	10	5	25	10
Total		344	224	344	224	359	229

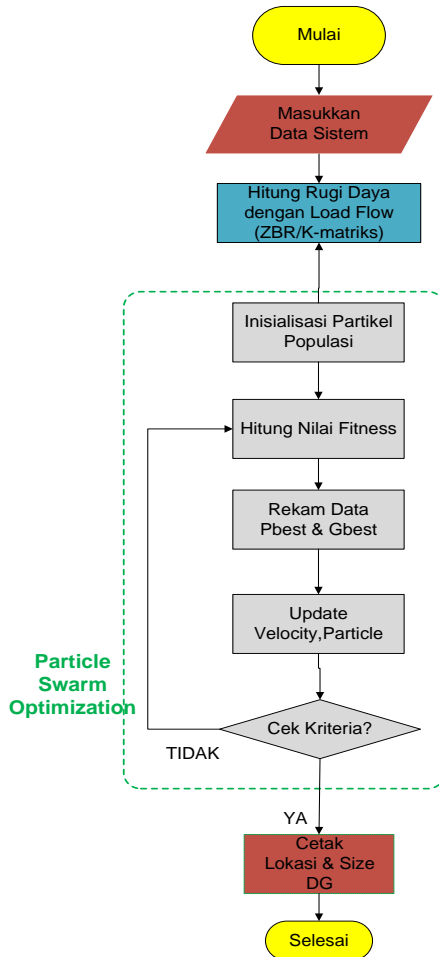
❖ Keterangan(*load model*) :

1. *Constant Power Load*
2. *Constant Current Load*
3. *Constant Impedance Load*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

### 4.1 Flowchart Simulasi



**Gambar 4.1** Prosedur Simulasi Penempatan DG

Berikut adalah penjelasan dari **Gambar 4.1** yang menjelaskan tentang prosedur dari simulasi untuk menentukan lokasi penempatan DG pada sistem distribusi 1 fasa IEEE 34 bus :

Langkah 1: Masukkan nilai line dan bus data IEEE 34 bus

Langkah 2 : Hitung rugi daya sistem menggunakan program load flow ZBR/K-matriks

Langkah 3 : Tentukan nilai populasi partikel secara random, set iterasi  $k=0$

Langkah 4 : Hitung nilai populasi partikel dengan persamaan fitness yang telah ditentukan (minimum rugi daya)

Langkah 5 : Dapatkan beberapa nilai Pbest dari langkah ke 4

Langkah 6 : Pilih partikel dengan Pbest individu yang terbaik, dari keseluruhan partikel. Kemudian update sebagai nilai Gbest

Langkah 7 : Update velocity untuk proses optimisasi yang menentukan arah dimana suatu *particle* diperlukan untuk berpindah (*move*) untuk memperbaiki posisinya semula.

Langkah 8 : Cek apakah nilai dari partikel tersebut sudah minimal, jika belum lakukan iterasi berikutnya  $k=k+1$ , dan kembali ke langkah 4

Langkah 9 : Cetak nilai partikel yang didapat, yang menunjukkan lokasi dan nilai Pdg terbaik



## 4.2 Hasil Simulasi Load flow

Berikut adalah data yang didapat setelah melakukan load flow pada matlab. Nilai yang ditampilkan adalah hasil running pada saat tanpa nilai dg, 1 sampai 4 nilai dg. Dan ditampilkan juga hasil validasi sudut tegangan antara Etap dan Matlab

### 4.2.1 Data Load flow dan Grafik Validasi Sudut Tegangan

**Tabel 4.1** Data Load flow tanpa DG

No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
1.0	20.0	0.0	20.07	-33.29	0.0	183.88
2.0	19.98	-0,010723	20.07	-33.29	0.02	183.88
3.0	19.97	-0,017926	20.07	-33.29	0.03	123.3
4.0	19.74	-0,153731	20.07	-33.29	0.26	2297.06
5.0	19.74	-0,153731	0.0	0.0	0.26	0.0
6.0	19.48	-0,315714	20.07	-33.29	0.52	2672.64
7.0	19.27	-0,44728	20.07	-33.29	0.73	2118.87
8.0	19.27	-0,447296	20.07	-33.29	0.73	1.04
9.0	19.27	-0,447786	20.07	-33.29	0.73	31.89
10.0	19.27	-0,447786	0.0	0.0	0.73	0.0
11.0	19.27	-0,447786	0.0	0.0	0.73	0.0
12.0	19.27	-0,447786	0.0	0.0	0.73	0.0
13.0	19.18	-0,463928	20.07	-33.29	0.83	1050.58
14.0	19.18	-0,463928	0.0	0.0	0.83	0.0
15.0	19.14	-0,454655	20.07	-33.29	0.86	452.14
16.0	18.95	-0,492522	20.07	-33.29	1.05	2103.19
17.0	18.95	-0,493301	19.55	-33.46	1.05	50.55
18.0	18.95	-0,493301	0.0	0.0	1.05	0.0
19.0	18.62	-0,550018	19.55	-33.46	1.38	3579.43
20.0	18.62	-0,550034	19.55	-33.46	1.38	0.98
21.0	18.6	-0,547542	11.27	-38.58	1.4	138.9
22.0	18.6	-0,547542	0.0	0.0	1.4	0.0
23.0	18.62	-0,550037	8.39	-26.57	1.38	2.98
24.0	18.59	-0,581693	8.39	-26.57	1.41	150.39
25.0	18.57	-0,544569	11.27	-38.58	1.43	165.26
26.0	18.57	-0,544456	9.32	-38.54	1.43	5.43
27.0	18.56	-0,543899	9.32	-38.54	1.44	26.21
28.0	18.56	-0,543596	1.38	-39.2	1.44	1.52
29.0	18.56	-0,543552	1.38	-39.2	1.44	0.22
30.0	18.57	-0,544368	1.95	-38.82	1.44	1.7
31.0	18.57	-0,544325	0.57	-37.87	1.44	0.2
32.0	18.56	-0,544311	0.57	-37.87	1.44	0.06
33.0	18.57	-0,544325	0.0	0.0	1.44	0.0
34.0	18.57	-0,544325	0.0	0.0	1.44	0.0
Total Rugi Daya 21756.10 W						

**Tabel 4.2** Data Load flow ditambahkan nilai 1 DG

No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
1.0	20.0	0,0	9.69	-37.62	0.0	8.01
2.0	19.99	0,0028	6.09	-54.92	0.01	8.01
3.0	19.99	0,0047	6.09	-54.92	0.01	5.37
4.0	19.92	0,0397	6.09	-54.92	0.08	100.05
5.0	19.92	0,0397	0.0	0.0	0.08	0.0
6.0	19.84	0,0807	6.09	-54.92	0.16	116.41
7.0	19.78	0,1135	6.09	-54.92	0.22	92.29
8.0	19.78	0,1135	6.09	-54.92	0.22	0.05
9.0	19.78	0,1143	6.09	-54.92	0.22	1.39
10.0	19.78	0,1143	0.0	0.0	0.22	0.0
11.0	19.78	0,1143	0.0	0.0	0.22	0.0
12.0	19.78	0,1143	0.0	0.0	0.22	0.0
13.0	19.75	0,1407	6.09	-54.92	0.25	45.76
14.0	19.75	0,1407	0.0	0.0	0.25	0.0
15.0	19.74	0,1553	6.09	-54.92	0.26	19.69
16.0	19.69	0,2075	6.09	-54.92	0.31	91.6
17.0	19.68	0,2089	5.61	-57.6	0.32	1.72
18.0	19.68	0,2089	0.0	0.0	0.32	0.0
19.0	19.6	0,3097	5.61	-57.6	0.4	121.84
20.0	19.6	0,3097	5.61	-57.6	0.4	0.03
21.0	19.6	0,332	4.6	-167.56	0.4	36.13
22.0	19.6	0,332	0.0	0.0	0.4	0.0
23.0	19.6	0,3098	8.39	-26.57	0.4	2.98
24.0	19.57	0,281	8.39	-26.57	0.43	150.39
25.0	19.61	0,3585	4.6	-167.56	0.39	42.99
26.0	19.61	0,3597	5.97	178.38	0.39	3.64
27.0	19.61	0,3603	9.69	-37.62	0.39	29.07
28.0	19.61	0,3605	1.31	-38.3	0.4	1.4
29.0	19.6	0,3606	1.31	-38.3	0.4	0.2
30.0	19.61	0,3587	1.88	-38.17	0.39	1.61
31.0	19.61	0,3588	0.57	-37.87	0.39	0.2
32.0	19.61	0,3588	0.57	-37.87	0.39	0.06
33.0	19.61	0,3588	0.0	0.0	0.39	0.0
34.0	19.61	0,3588	0.0	0.0	0.39	0.0
Total Rugi Daya 2215.48W						

**Tabel 4.3** Data Load flow ditambahkan nilai 2 DG

No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
1.0	20.0	0,0	8.39	-26.57	0.0	0.86
2.0	20.0	0,007416	5.23	-77.34	0.0	0.86

No.bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
3.0	19.99	0,01239	5.23	-77.34	0.01	0.58
4.0	19.94	0,105311	5.23	-77.34	0.06	10.74
5.0	19.94	0,105311	0.0	0.0	0.06	0.0
6.0	19.88	0,214023	5.23	-77.34	0.12	12.49
7.0	19.84	0,300671	5.23	-77.34	0.16	9.9
8.0	19.84	0,300717	5.23	-77.34	0.16	0.0
9.0	19.84	0,302122	5.23	-77.34	0.16	0.15
10.0	19.84	0,302122	0.0	0.0	0.16	0.0
11.0	19.84	0,302122	0.0	0.0	0.16	0.0
12.0	19.84	0,302122	0.0	0.0	0.16	0.0
13.0	19.82	0,348449	5.23	-77.34	0.18	4.91
14.0	19.82	0,348449	0.0	0.0	0.18	0.0
15.0	19.81	0,369452	5.23	-77.34	0.19	2.11
16.0	19.77	0,462198	5.23	-77.34	0.23	9.83
17.0	19.77	0,464634	4.91	-82.38	0.23	0.08
18.0	19.77	0,464634	0.0	0.0	0.23	0.0
19.0	19.72	0,637581	4.91	-82.38	0.28	5.7
20.0	19.72	0,637629	4.91	-82.38	0.28	0.0
21.0	19.73	0,669126	6.94	-170.77	0.27	84.02
22.0	19.73	0,669126	0.0	0.0	0.27	0.0
23.0	19.72	0,637656	8.39	-26.57	0.28	2.98
24.0	19.69	0,609575	8.39	-26.57	0.31	150.39
25.0	19.74	0,706555	6.94	-170.77	0.26	99.97
26.0	19.74	0,708324	8.32	179.76	0.26	7.09
27.0	19.74	0,710306	7.34	-44.23	0.26	13.64
28.0	19.74	0,714456	1.47	-179.29	0.26	2.87
29.0	19.74	0,714495	1.3	-37.95	0.26	0.2
30.0	19.74	0,706768	1.87	-37.93	0.26	1.6
31.0	19.74	0,706852	0.57	-37.87	0.26	0.2
32.0	19.74	0,706879	0.57	-37.87	0.26	0.06
33.0	19.74	0,706852	0.0	0.0	0.26	0.0
34.0	19.74	0,706852	0.0	0.0	0.26	0.0
Total Rugi Daya 1823.07W						

**Tabel 4.4** Data Load flow ditambahkan nilai 3 DG

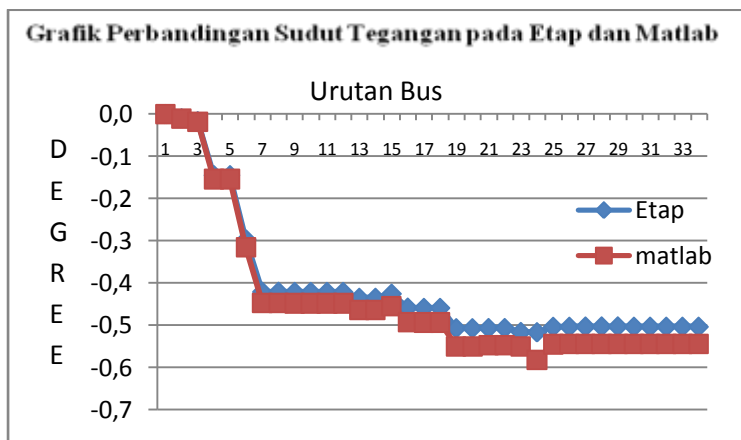
No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
1.0	20.0	0,0	8.39	-26.57	0.0	0.01
2.0	20.0	2,59E-4	0.14	-179.4	-0.0	0.01
3.0	20.0	4,32E-4	0.14	-179.4	-0.0	0.01
4.0	20.0	0,003664	0.14	-179.4	-0.0	0.15
5.0	20.0	0,003664	0.0	0.0	-0.0	0.0
6.0	20.0	0,007424	0.14	-179.4	-0.0	0.18
7.0	20.0	0,010404	0.14	-179.4	-0.0	0.14

No.bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
8.0	20.0	0,010405	0.14	-179.4	-0.0	0.0
9.0	20.0	0,011765	5.32	-75.69	-0.0	0.2
10.0	20.0	0,011765	0.0	0.0	-0.0	0.0
11.0	20.0	0,011765	0.0	0.0	-0.0	0.0
12.0	20.0	0,011765	0.0	0.0	-0.0	0.0
13.0	19.98	0,056606	5.32	-75.69	0.02	6.44
14.0	19.98	0,056606	0.0	0.0	0.02	0.0
15.0	19.98	0,077138	5.32	-75.69	0.02	2.77
16.0	19.94	0,166857	5.32	-75.69	0.06	12.89
17.0	19.94	0,169216	4.97	-80.57	0.06	0.13
18.0	19.94	0,169216	0.0	0.0	0.06	0.0
19.0	19.88	0,336805	4.97	-80.57	0.12	8.93
20.0	19.88	0,336852	4.97	-80.57	0.12	0.0
21.0	19.89	0,367848	6.78	-170.22	0.11	80.06
22.0	19.89	0,367848	0.0	0.0	0.11	0.0
23.0	19.88	0,336871	8.39	-26.57	0.12	2.98
24.0	19.85	0,308561	8.39	-26.57	0.15	150.39
25.0	19.9	0,404683	6.78	-170.22	0.1	95.25
26.0	19.9	0,406424	8.15	-179.96	0.1	6.79
27.0	19.9	0,408382	7.41	-44.4	0.1	13.84
28.0	19.9	0,412465	1.46	-179.59	0.1	2.83
29.0	19.9	0,412503	1.29	-38.25	0.1	0.2
30.0	19.9	0,404885	1.86	-38.14	0.1	1.58
31.0	19.9	0,404958	0.57	-37.87	0.1	0.2
32.0	19.9	0,404981	0.57	-37.87	0.1	0.06
33.0	19.9	0,404958	0.0	0.0	0.1	0.0
34.0	19.9	0,404958	0.0	0.0	0.1	0.0
Total rugi daya 1115.08W						

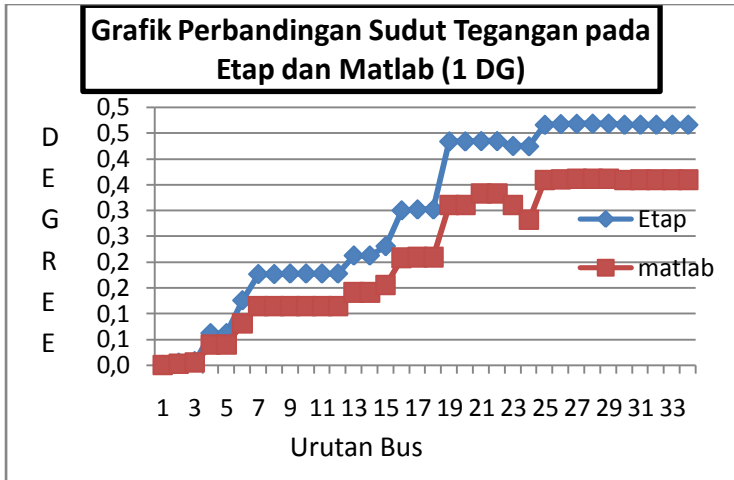
**Tabel 4.5** Data Load flow ditambahkan nilai 4 DG

No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
1.0	20.0	0,0	8.39	-26.57	0.0	0.01
2.0	20.0	1,5E-4	0.09	174.82	-0.0	0.01
3.0	20.0	2,5E-4	0.09	174.82	-0.0	0.0
4.0	20.0	0,002124	0.09	174.82	-0.0	0.06
5.0	20.0	0,002124	0.0	0.0	-0.0	0.0
6.0	20.0	0,004303	0.09	174.82	-0.0	0.07
7.0	20.0	0,00603	0.09	174.82	-0.0	0.06
8.0	20.0	0,006031	0.09	174.82	-0.0	0.0
9.0	20.0	0,005786	1.38	-10.07	-0.0	0.21
10.0	20.0	0,005786	0.0	0.0	-0.0	0.0
11.0	20.0	0,005786	0.0	0.0	-0.0	0.0

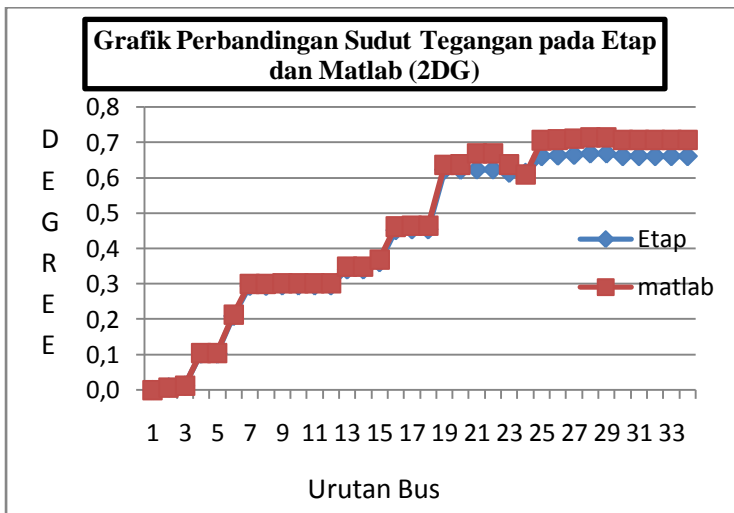
No bus	Voltage		Current		Drop Voltage (KV)	P Losses (W)
	Mag (KV)	Deg	Mag (A)	Deg		
12.0	20.0	0,005786	0.0	0.0	-0.0	0.0
13.0	20.0	-0,002274	1.38	-10.07	0.0	6.92
14.0	20.0	-0,002274	0.0	0.0	0.0	0.0
15.0	19.99	-0,004488	1.38	-10.07	0.01	2.98
16.0	19.98	-0,021032	1.38	-10.07	0.02	13.85
17.0	19.98	-0,02138	0.86	0.54	0.02	0.14
18.0	19.98	-0,02138	0.0	0.0	0.02	0.0
19.0	19.97	-0,04608	0.86	0.54	0.03	10.0
20.0	19.97	-0,046035	4.98	-79.55	0.03	0.0
21.0	19.98	-0,015332	6.7	-170.12	0.02	77.95
22.0	19.98	-0,015332	0.0	0.0	0.02	0.0
23.0	19.97	-0,046026	8.39	-26.57	0.03	2.98
24.0	19.94	-0,074783	8.39	-26.57	0.06	150.39
25.0	19.99	0,021157	6.7	-170.12	0.01	92.74
26.0	19.99	0,022883	8.05	179.99	0.01	6.63
27.0	19.99	0,024826	7.46	-44.71	0.01	13.85
28.0	19.99	0,028872	1.45	-179.97	0.01	2.8
29.0	19.99	0,002891	1.28	-38.63	0.01	0.19
30.0	19.99	0,021347	1.85	-38.4	0.01	1.55
31.0	19.99	0,021406	0.57	-37.87	0.01	0.2
32.0	19.99	0,021425	0.57	-37.87	0.01	0.06
33.0	19.99	0,021406	0.0	0.0	0.01	0.0
34.0	19.99	0,021406	0.0	0.0	0.01	0.0
Total rugi daya 442.85W						



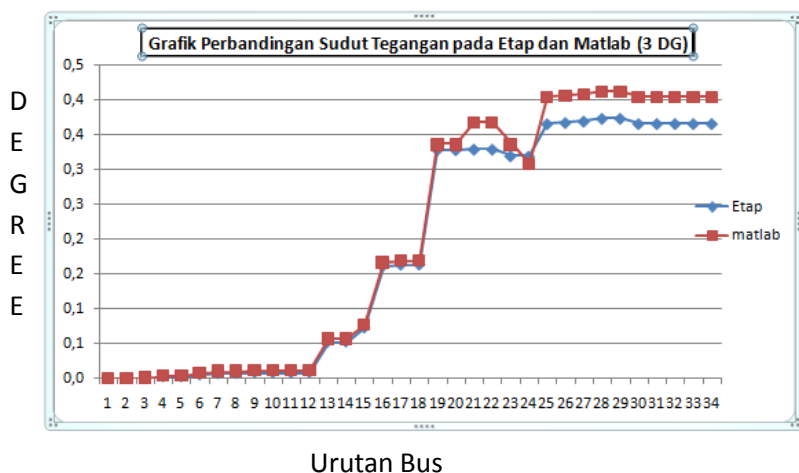
**Gambar 4.2** Grafik sudut tegangan tanpa input DG



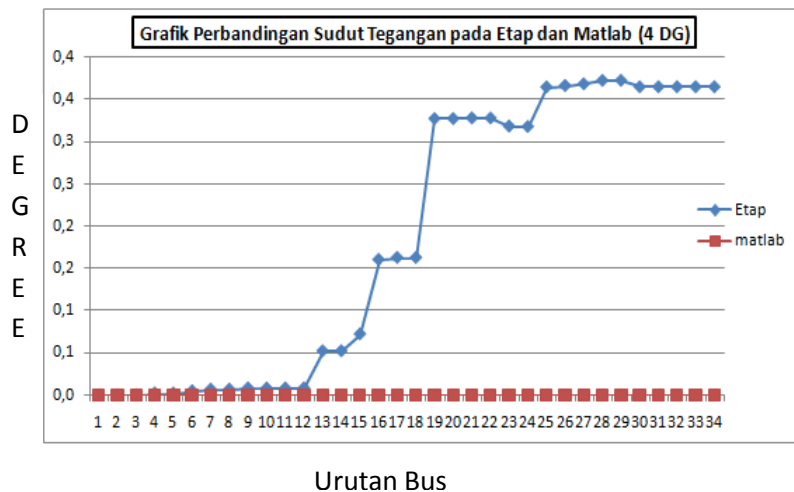
**Gambar 4.3** Grafik sudut tegangan dengan input 1 DG



**Gambar 4.4** Grafik sudut tegangan dengan input 2 DG



**Gambar 4.5** Grafik sudut tegangan dengan input 3 DG



**Gambar 4.6** Grafik sudut tegangan dengan input 4 DG

### 4.3 Hasil Penempatan DG Optimum pada Jaringan Distribusi IEEE 34 bus

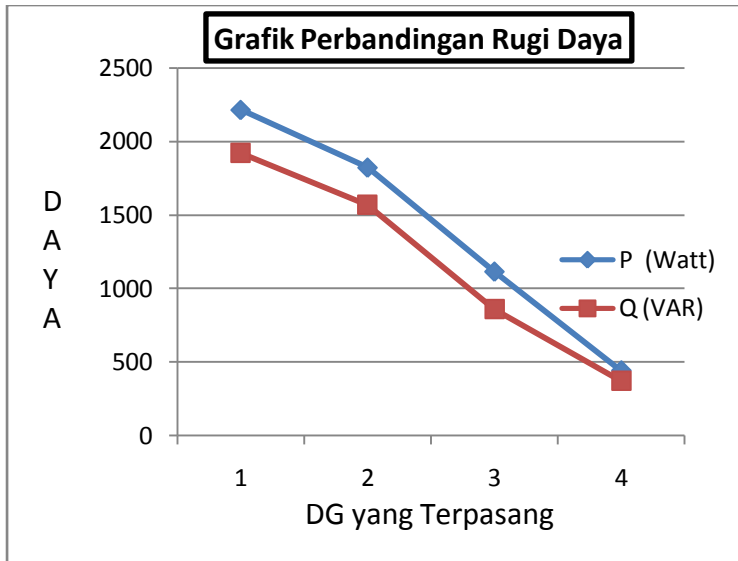
Berikut adalah data lokasi Dg optimum yang terpasang hingga 4 lokasi. Pada tabel diawah ini juga ditampilkan nilai rugi daya total yang semula memiliki nilai 21756,10 Watt menjadi 442.85 watt dan ditampilkan pula dalam bentuk grafik.

**Tabel 4.6** Data Hasil Optimasi Penempatan DG

Jumlah DG	Lokasi DG	P DG (MW)	Total Size DG (MW)	Rugi-rugi sebelum penempatan DG	Rugi-rugi setelah penempatan DG
1	26	0.2668	0.2668	21756,10 W 18695,85VAR	2215.48W 1921.4VAR
2	26	0.2668	0.3158		1823.07W 1568.5VAR
	28	0.049			
3	26	0.2668	0.3448		1115.08W 858.81VAR
	28	0.049			
	8	0.029			
4	26	0.2668	0.3457		442.85W 372.73VAR
	28	0.049			
	8	0.029			
	19	0.0009			

Dari tabel diatas menunjukkan bahwa nilai PDG yang terpasang semua adalah **0.3457 MW**, sehingga dapat memenuhi kebutuhan beban yang berjumlah **0.344 MW**. Perlu diketahui juga bahwa nilai P pada bus 1 (PLN) sebelum terpasang DG sebesar **0.365 MW** dan berkurang nilainya seiring masuknya nilai DG, sebesar **0.12 MW**.





**Gambar 4.7** Grafik perbandingan rugi daya

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5 PENUTUP**

### **5.1 KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Pada proses optimasi penempatan DG didapatkan 4 lokasi untuk nilai DG yaitu pada bus 26,28,8,dan 19
- Setelah melakukan optimasi nilai rugi daya semakin minimal, yang semula mempunyai nilai 21756,10 W kemudian setelah dilakukan optimasi menjadi 1115.08W
- Hasil validasi metode analisis aliran daya menggunakan metode yang diusulkan dengan hasil analisis aliran daya menggunakan *software* ETAP . Didapatkan nilai sudut tegangan yang tidak sesuai pada saat menempatkan nilai DG yang ke-4 (bus 19)

### **5.2 SARAN**

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

- Program analisis aliran daya yang telah dikembangkan hanya dapat digunakan untuk pemasangan DG sampai 3 tempat. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat melakukan optimasi untuk mendapat hasil yang lebih baik
- Pada saat menyelesaikan analisi aliran daya dengan program ini sebaiknya dilakukan pula validasi dengan menggunakan *software* ETAP
- Banyak metode yang bisa dibandingkan pada saat melakukan optimasi penempatan DG selain metode PSO. Hasil yang didapat pada tugas akhir ini, semoga dapat dibandingkan pada saat melakukan penelitian selanjutnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Belly, Alto dkk 2010. Daya aktif , Reaktif & Semu. 2010 : Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [2] Djiteng Marsudi. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Yogyakarta : Graha Ilmu.
- [3] J. Wood, Allen and Wollenberg, Bruce F. “*Power Generation and Operation Control (Second Edition)*”, John Wiley & Sons Inc, United States of America, 1996
- [4] M.Padma Lalitha,V.C. Veera Reddy, V.Usha. “Optimal DG Placement for Minimum Real Power Loss in Radial Distribution Systems Using PSO”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology 2010
- [5] Kennedy J and Eberhart R, “Particle Swarm Optimizer,” IEEE International Conference on Neural Networks (Perth, Australia), IEEE Service Center Piscataway, NJ, IV, pp1942-1948, 1995.
- [6] Aji Dharma, Ontoseno Penangsang, Rony Seto Wibowo, “Penempatan Optimal Sensor Dengan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) Untuk State Estimation Pada Sistem Distribusi Surabaya” Jurnal Teknik POMITS Vol. 2, No. 1, (2014)
- [7] Syaiin, Matt, “Handout Power Flow Analysis”, PPNS-ITS, Surabaya, 2013

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BIODATA PENULIS**



Penulis bernama lengkap Dwiky Alif Satria dan dilahirkan di Semarang – Jawa Tengah pada Tahun 1990. Penulis memulai pendidikan di Sekolah Dasar YKPP 01 Cilacap dan melanjutkan pendidikan Sekolah Mengah Pertama di SMP Negeri 2 Semarang dan SMA Trimurti Surabaya. Pada tahun 2009, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Diploma di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya dengan konsentrasi bidang studi Teknik Elektro Industri. Pada tahun 2012 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan diploma dan pada saat itu juga melanjutkan pendidikan untuk jenjang sarjana. Pendidikan sarjana ditempuh di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya di jurusan teknik elektro dengan konsentrasi bidang studi sistem tenaga. Pada tahun 2015 penulis berhasil menyelesaikan pendidikan sarjana.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*